

СПУТНИКОВЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ GPS и GLONASS

И.Н. Барабанов

Кафедра теоретической механики МФТИ,
Институт проблем управления РАН,
Javad GNSS

Межпредметный семинар МФТИ, 29.10.08

Оглавление

- 1 GPS и ГЛОНАСС
 - История создания GPS и ГЛОНАСС
 - Структура GPS
- 2 Определение координат с помощью спутниковой навигационной системы
- 3 Точность определения координат
 - Факторы, влияющие на погрешность измерений
 - Методы повышения точности измерений
- 4 Приложения
- 5 Перспективы развития спутниковых навигационных систем

История создания GPS и GLONASS

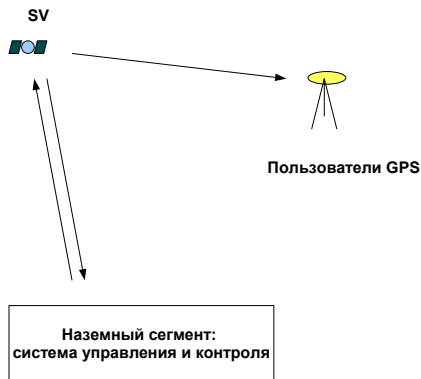
GPS (Global Positioning System, USA)

- Начало 1960-х:
возникновение идеи
- Конец 1960-х: система TRANSIT, предшественник GPS
- 1978–1986: первое созвездие спутников NAVSTAR (NAVigation Satellite providing Time And Range)
- 1989–1994: современная конфигурация системы

ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система, Россия)

- 1957: первый ИСЗ
- 1970-е: “Циклон-Б”, “Цикада” – предшественники ГЛОНАСС
- 1976: начало работ по ГЛОНАСС
- 1982: запуск первого спутника
- 1993: ввод в эксплуатацию (в неполной конфигурации)

Структура GPS



- Созвездие спутников
- Наземные станции слежения и управления спутниками (Falcon, Colorado)
- GPS-приемники

Созвездие спутников GPS

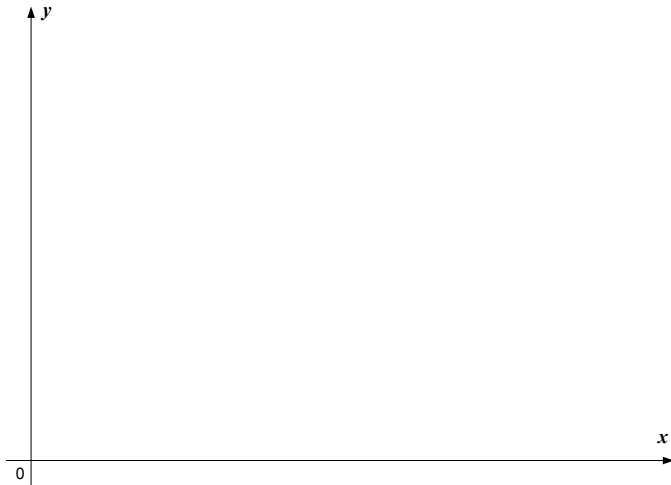


- 24 спутника, по 6 на 4 орбитах (28)
- Эллиптическая орбита близкая к круговой, высота 20350 км
- период обращения $T \approx 12$ часов, скорость спутника $v \approx 4$ км/с

Приемник GPS



Определение координат на плоскости



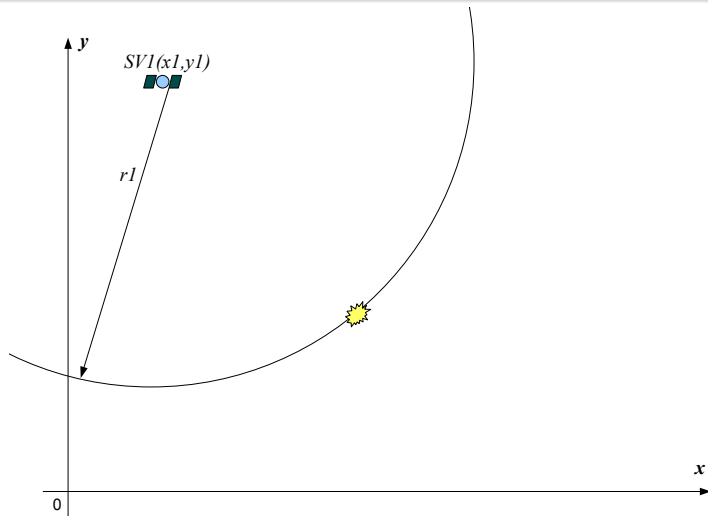
Определение координат на плоскости



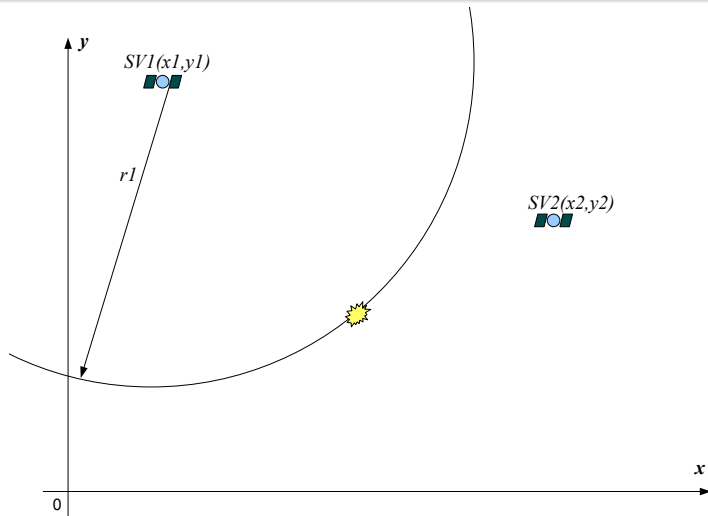
Определение координат на плоскости



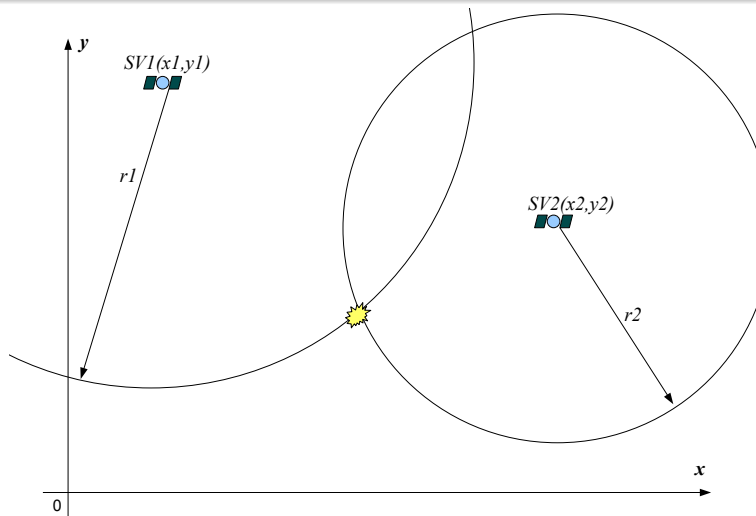
Определение координат на плоскости



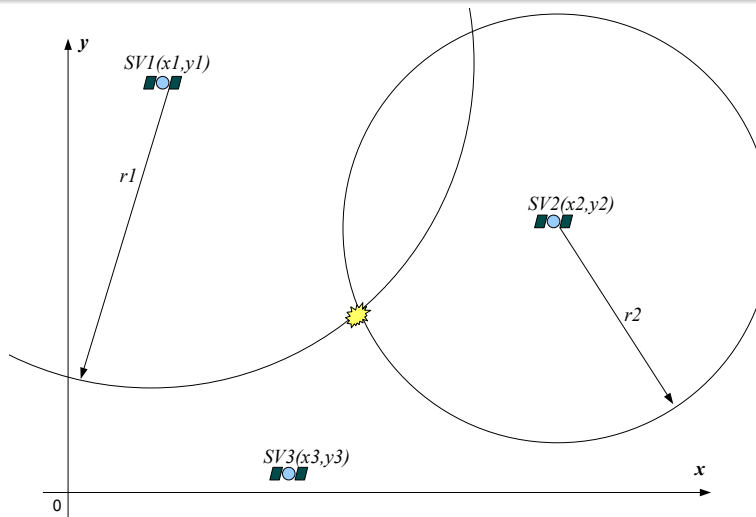
Определение координат на плоскости



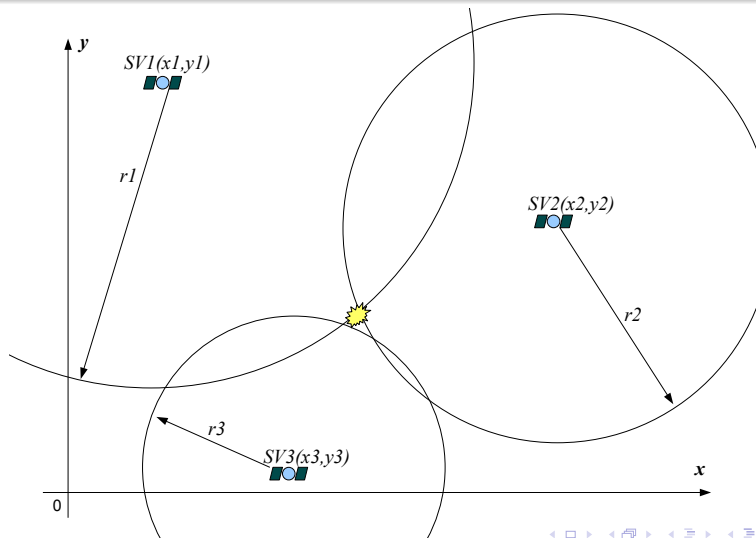
Определение координат на плоскости



Определение координат на плоскости



Определение координат на плоскости



Определение псевдодальностей



τ — время, измеряемое приемником;

$\Delta t = t_{\text{Rec}} - t_{\text{SV}}$ — разность хода часов спутника и приемника;

R — расстояние между спутником и приемником;

c — скорость света;

R/c — время распространения сигнала от спутника к приемнику $\approx 70\text{ms}$.

Уравнения наблюдений

$$c\tau_i = \rho_i = R_i + c\Delta t + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad n \geq 4$$

ρ_i — измеряемая псевдодальность;

n — количество спутников;

ε_i — ошибки измерений: $\varepsilon = \mathcal{N}[0, W^{-1}]$, $W^{-1} > 0$ — матрица ковариаций ошибок.

Невязка: $\zeta_i = \rho_i - (R_i + c\Delta t) =$

$$= \rho_i - \left(\sqrt{(X_i^{\text{sv}} - x)^2 + (Y_i^{\text{sv}} - y)^2 + (Z_i^{\text{sv}} - z)^2} + c\Delta t \right),$$

$$J = \frac{1}{2} \zeta^T W \zeta \rightarrow \min_{x, y, z, \Delta t}$$

Линеаризованная задача

Линеаризуем уравнения наблюдений вблизи некоторого положения \vec{r}_0 : $\vec{r} = \vec{r}_0 + \Delta\vec{r}$,

$$R_i = \alpha_i \Delta x + \beta_i \Delta y + \gamma_i \Delta z,$$

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ — направляющие косинусы линий визирования спутников $\vec{r}_i^{\text{sv}} - \vec{r}_0$.

Линеаризованные уравнения наблюдений:

$$\mu_i = \rho_i - |\vec{r}_i^{\text{sv}} - \vec{r}_0| = \alpha_i \Delta x + \beta_i \Delta y + \gamma_i \Delta z + c\Delta t + \varepsilon_i.$$

Решение линеаризованной задачи

$$\mu = \text{Ha} : \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \vdots \\ \mu_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \vdots \\ \alpha_n & \beta_n & \gamma_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \end{bmatrix}$$

$$J = \frac{1}{2}(\mu - \text{Ha})^T W (\mu - \text{Ha}) \rightarrow \min_a$$

$$J = \frac{1}{2}\mu^T W \mu + a^T H^T W \text{Ha} - a^T H^T W \mu \rightarrow \min_a$$

$$\nabla J_a = 0 \Rightarrow H^T W \text{Ha} = H^T W \mu \Rightarrow a = (H^T W H)^{-1} H^T W \mu$$

Точность решения — 0.5–50 м.

Факторы, влияющие на погрешность измерений

- Погрешность хода спутниковых часов, неточность определения координат спутников (до 3 м)
- Тепловые шумы в приемнике (до 10 м)
- Селективный доступ (до 30 м)
- Многолучевость (до 50 м)
- Тропосферные и ионосферные погрешности (до 30 м)

Факторы, влияющие на погрешность измерений

- Погрешность хода спутниковых часов, неточность определения координат спутников (до 3 м)
- Тепловые шумы в приемнике (до 10 м)
- Селективный доступ (до 30 м)
- Многолучевость (до 50 м)
- Тропосферные и ионосферные погрешности (до 30 м)

Факторы, влияющие на погрешность измерений

- Погрешность хода спутниковых часов, неточность определения координат спутников (до 3 м)
- Тепловые шумы в приемнике (до 10 м)
- Селективный доступ (до 30 м)
- Многолучевость (до 50 м)
- Тропосферные и ионосферные погрешности (до 30 м)

Факторы, влияющие на погрешность измерений

- Погрешность хода спутниковых часов, неточность определения координат спутников (до 3 м)
- Тепловые шумы в приемнике (до 10 м)
- Селективный доступ (до 30 м)
- Многолучевость (до 50 м)
- Тропосферные и ионосферные погрешности (до 30 м)

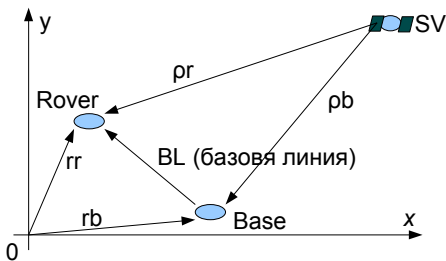
Факторы, влияющие на погрешность измерений

- Погрешность хода спутниковых часов, неточность определения координат спутников (до 3 м)
- Тепловые шумы в приемнике (до 10 м)
- Селективный доступ (до 30 м)
- Многолучевость (до 50 м)
- Тропосферные и ионосферные погрешности (до 30 м)

Методы повышения точности измерений

- Моделирование ионосферы
- Усреднение многолучевости
- Применение дифференциального режима

Дифференциальный режим измерения координат:



Линеаризованная дифференциальная задача

Кодовые измерения:

$$\mu_i^R - \mu_i^B = \alpha_i \Delta x + \beta_i \Delta y + \gamma_i \Delta z + c(\Delta t^B - \Delta t^R) + \varepsilon_i$$

$\varepsilon_i \approx 1\text{m}$ — погрешность кодового измерения базовой линии

Фазовые измерения:

$$\varphi_i = \frac{1}{\lambda} R_i + \frac{c}{\lambda} (\Delta t^B - \Delta t^R) + N_i + \xi_i$$

$\lambda \approx 20\text{cm}$ — длина волны несущего сигнала,

$\xi_i \approx 1\text{cm}$ — погрешность фазового измерения

Определение координат по коду и фазе

$$\mu = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \vdots \\ \rho_n \\ \varphi_1 \\ \vdots \\ \varphi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 & & & \\ & \vdots & & & \dots & 0 & \dots \\ \alpha_n & \beta_n & \gamma_n & 1 & & & \\ \frac{\alpha_1}{\lambda} & \frac{\beta_1}{\lambda} & \frac{\gamma_1}{\lambda} & \frac{1}{\lambda} & 1 & \dots & 0 \\ & \vdots & & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\alpha_n}{\lambda} & \frac{\beta_n}{\lambda} & \frac{\gamma_n}{\lambda} & \frac{1}{\lambda} & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \\ \dots \\ N_1 \\ \vdots \\ N_n \end{bmatrix}$$

$\underbrace{\hspace{15em}}_H \qquad \underbrace{\hspace{5em}}_A$

$$J = \frac{1}{2}(\mu - HA)^T W(\mu - HA) \rightarrow \min_{a \in \mathbb{R}^4, N \in \mathbb{Z}^n}$$

Точность решения $\approx 0.5\text{cm}$

Приложения

- Военные приложения
- Бытовые приборы: смартфоны, автомобильные навигаторы и т.п.
- Навигационные приборы судов, самолетов, ракет и т.д., в сочетании с приборами инерциальной навигации
- Геодезические приложения: составление карт, исследование тектоники плит и т.п.
- Строительные приложения
- Сельскохозяйственные приложения

Приложения

- Военные приложения
- Бытовые приборы: смартфоны, автомобильные навигаторы и т.п.
- Навигационные приборы судов, самолетов, ракет и т.д., в сочетании с приборами инерциальной навигации
- Геодезические приложения: составление карт, исследование тектоники плит и т.п.
- Строительные приложения
- Сельскохозяйственные приложения

Приложения

- Военные приложения
- Бытовые приборы: смартфоны, автомобильные навигаторы и т.п.
- Навигационные приборы судов, самолетов, ракет и т.д., в сочетании с приборами инерциальной навигации
- Геодезические приложения: составление карт, исследование тектоники плит и т.п.
- Строительные приложения
- Сельскохозяйственные приложения

Приложения

- Военные приложения
- Бытовые приборы: смартфоны, автомобильные навигаторы и т.п.
- Навигационные приборы судов, самолетов, ракет и т.д., в сочетании с приборами инерциальной навигации
- Геодезические приложения: составление карт, исследование тектоники плит и т.п.
- Строительные приложения
- Сельскохозяйственные приложения

Приложения

- Военные приложения
- Бытовые приборы: смартфоны, автомобильные навигаторы и т.п.
- Навигационные приборы судов, самолетов, ракет и т.д., в сочетании с приборами инерциальной навигации
- Геодезические приложения: составление карт, исследование тектоники плит и т.п.
- Строительные приложения
- Сельскохозяйственные приложения

Приложения

- Военные приложения
- Бытовые приборы: смартфоны, автомобильные навигаторы и т.п.
- Навигационные приборы судов, самолетов, ракет и т.д., в сочетании с приборами инерциальной навигации
- Геодезические приложения: составление карт, исследование тектоники плит и т.п.
- Строительные приложения
- Сельскохозяйственные приложения

Перспективы развития

- Введение в строй полной конфигурации спутников ГЛОНАСС
- Добавление новой частоты в сигналах GPS
- Навигационные сигналы на геостационарных спутниках
- Европейская спутниковая навигационная система Galileo (2010)
- Наземные устройства (приемники): комбинирование с инерциальными и оптическими навигационными приборами, создание приемников, работающих внутри помещений и т.п.

Перспективы развития

- Введение в строй полной конфигурации спутников ГЛОНАСС
- Добавление новой частоты в сигналах GPS
- Навигационные сигналы на геостационарных спутниках
- Европейская спутниковая навигационная система Galileo (2010)
- Наземные устройства (приемники): комбинирование с инерциальными и оптическими навигационными приборами, создание приемников, работающих внутри помещений и т.п.

Перспективы развития

- Введение в строй полной конфигурации спутников ГЛОНАСС
- Добавление новой частоты в сигналах GPS
- Навигационные сигналы на геостационарных спутниках
- Европейская спутниковая навигационная система Galileo (2010)
- Наземные устройства (приемники): комбинирование с инерциальными и оптическими навигационными приборами, создание приемников, работающих внутри помещений и т.п.

Перспективы развития

- Введение в строй полной конфигурации спутников ГЛОНАСС
- Добавление новой частоты в сигналах GPS
- Навигационные сигналы на геостационарных спутниках
- Европейская спутниковая навигационная система Galileo (2010)
- Наземные устройства (приемники): комбинирование с инерциальными и оптическими навигационными приборами, создание приемников, работающих внутри помещений и т.п.

Перспективы развития

- Введение в строй полной конфигурации спутников ГЛОНАСС
- Добавление новой частоты в сигналах GPS
- Навигационные сигналы на геостационарных спутниках
- Европейская спутниковая навигационная система Galileo (2010)
- Наземные устройства (приемники): комбинирование с инерциальными и оптическими навигационными приборами, создание приемников, работающих внутри помещений и т.п.