

Точная Спутниковая Навигация и её Применение в Земледелии

Рапопорт Л.Б.

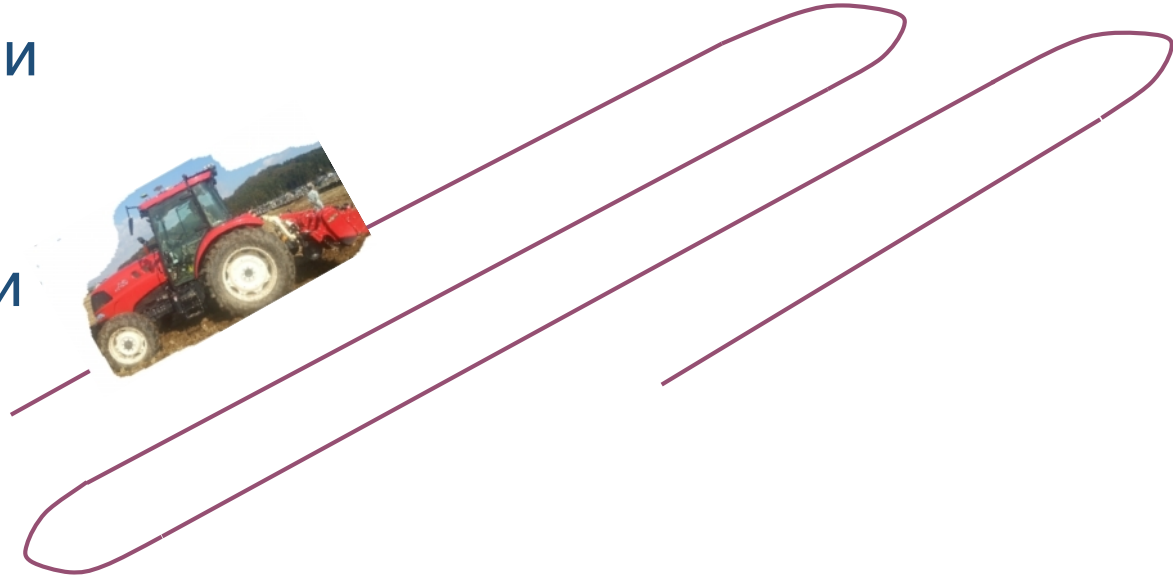
Институт проблем управления им.
В.А.Трапезникова РАН

Управление колесными роботами и задачи точной навигации

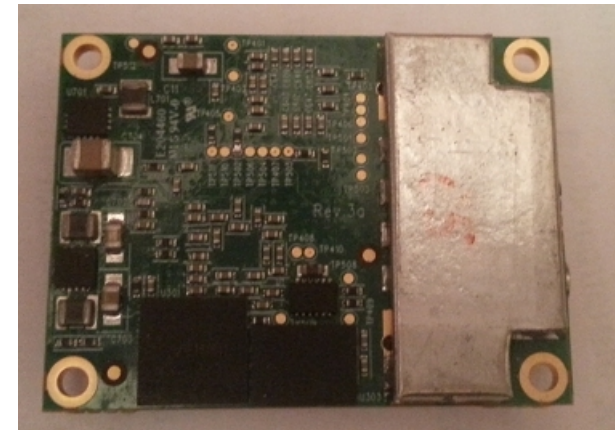
- Оценка положения и ориентации в координатах локального горизонта
- Планирование траекторий, аппроксимация путей кривыми из заданных параметрических классов, отвечающих реализуемым траекториям
- Синтез робастного закона управления, гарантирующего асимптотическую стабилизацию движения
- Оценка областей притяжения

Навигация

Оценка положения и ориентации относительно целевой траектории



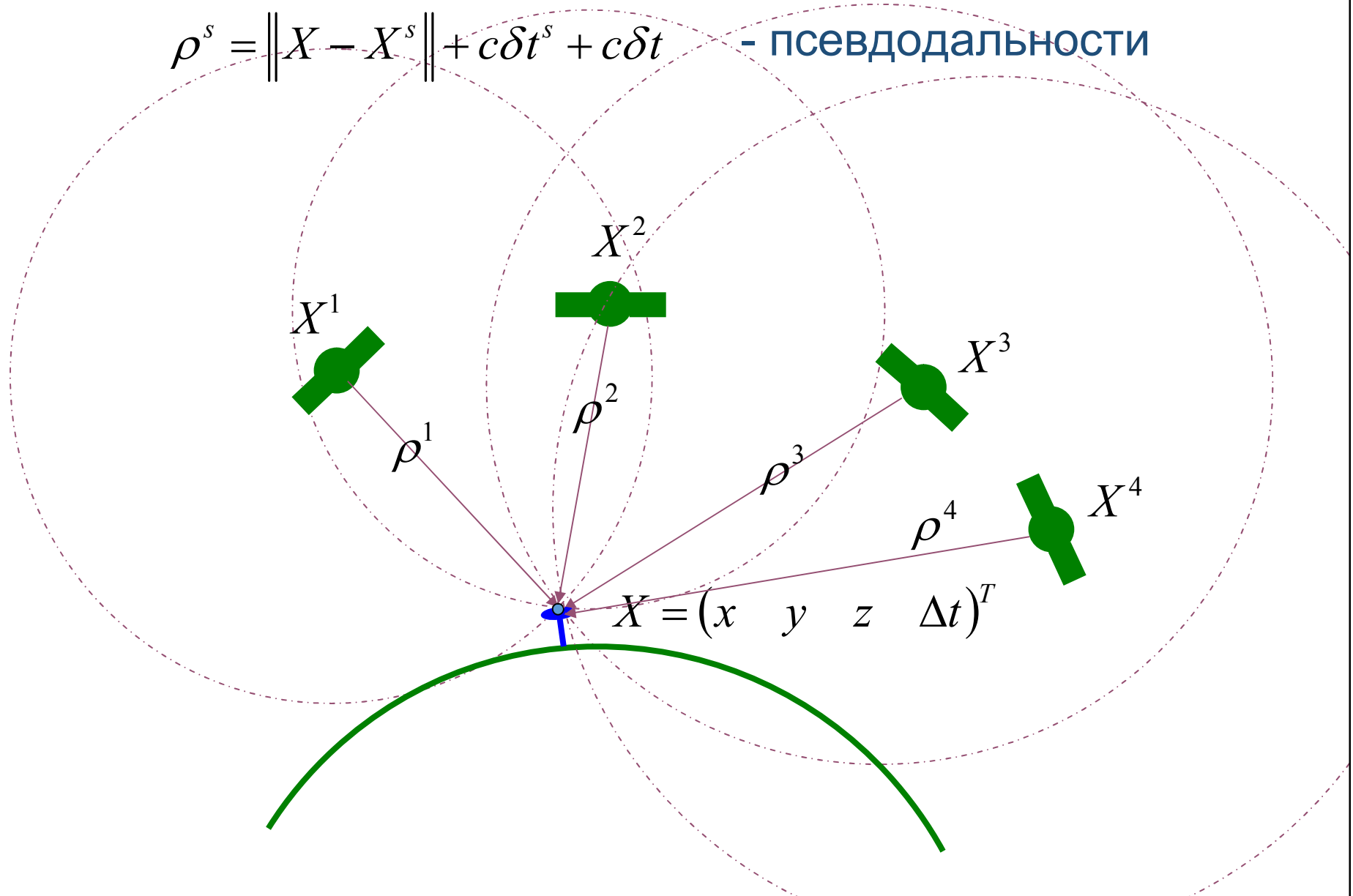
Используется приемник GNSS, работающий в фазово-дифференциальном режиме, и инерциальные сенсоры.
В настоящее время GNSS включает GPS, GLONASS, GALILEO, QZSS, BeiDou, IRNSS.





Принципы GNSS навигации

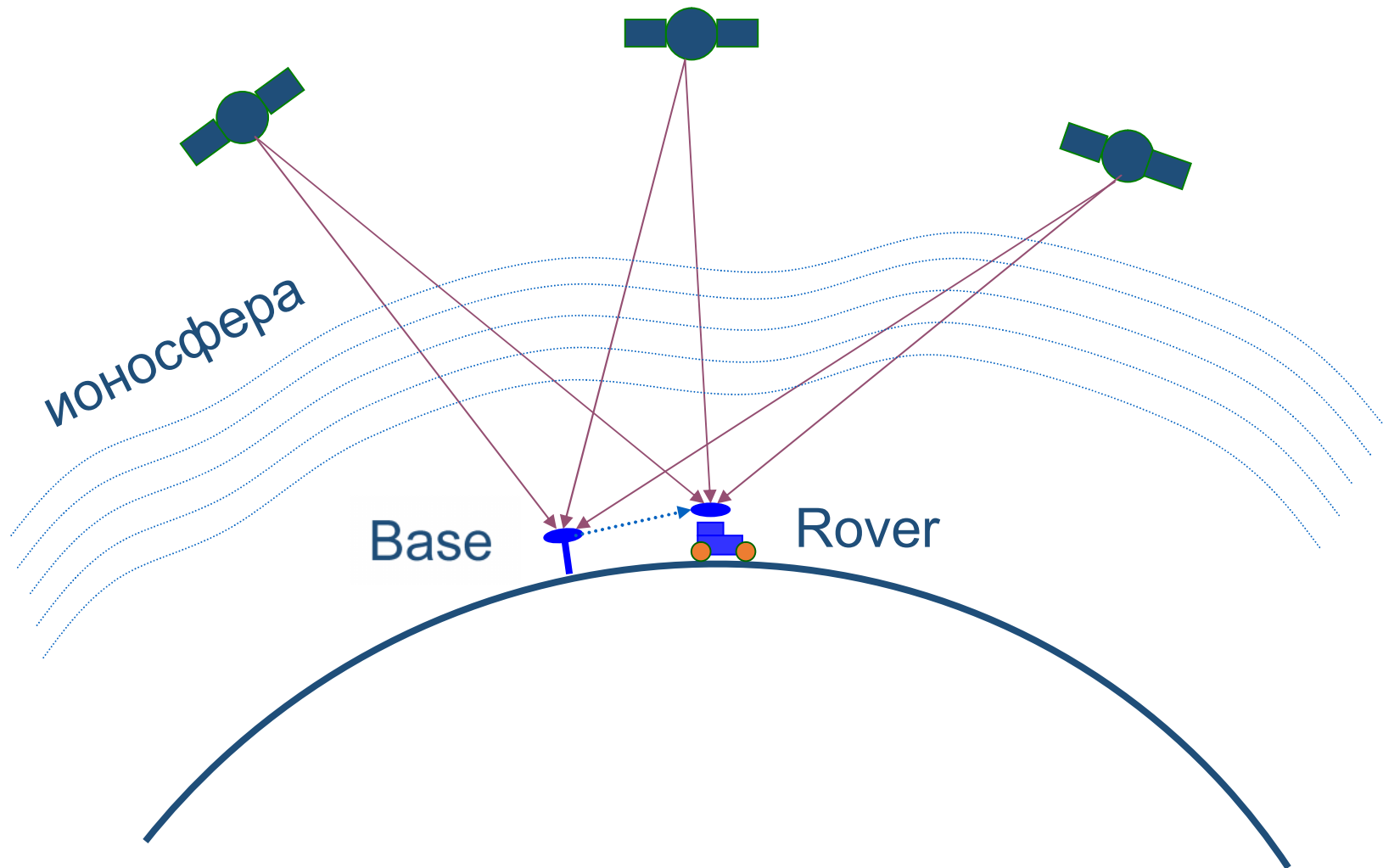
$$\rho^s = \|X - X^s\| + c\delta t^s + c\delta t \quad - \text{псевдодальности}$$



Источники ошибок GNSS

1. Белый шум. Порождается МШУ и умножается в процессе цифровой обработки
2. Ошибка эфемерид. Орбиты спутников не кеплеровские и возмущены влиянием Луны, Солнца, несферичностью силового поля Земли, солнечным ветром
3. Ионосферная задержка. Порождена слоем свободных электронов в ионосфере. Обратна пропорциональна квадрату несущей частоты. Частично компенсируется при взятии первых разностей. Частично компенсируется алгоритмом оценивания.
4. Тропосферная задержка. Порождается водяным паром. Частично компенсируется моделированием.
5. Многолучевость + code bit rate (~ 10 ns). Порождается локальными отражателями. Частично компенсируется конструкцией антенны. Частично компенсируется алгоритмами обработки (узкими следящими стробами)

Относительная (дифференциальная) GNSS навигация. Компенсация ионосферных и эфемеридных ошибок



Измерения GNSS (1)

$X^s \in R^3$ - позиция спутника s

$X_a \in R^3$ - позиция антенны

∇ -разности между спутниками

Δ -разности между приемниками

Кодовые измерения $\rho^s = \|X_a - X^s\| + c\delta t^s + c\delta t + I^s + T^s,$

Фазовые измерения $\phi^s = \frac{1}{\lambda^s} \left(\|X_a - X^s\| + c\delta t^s + f^s \delta t + N^s - I^s + T^s \right)$

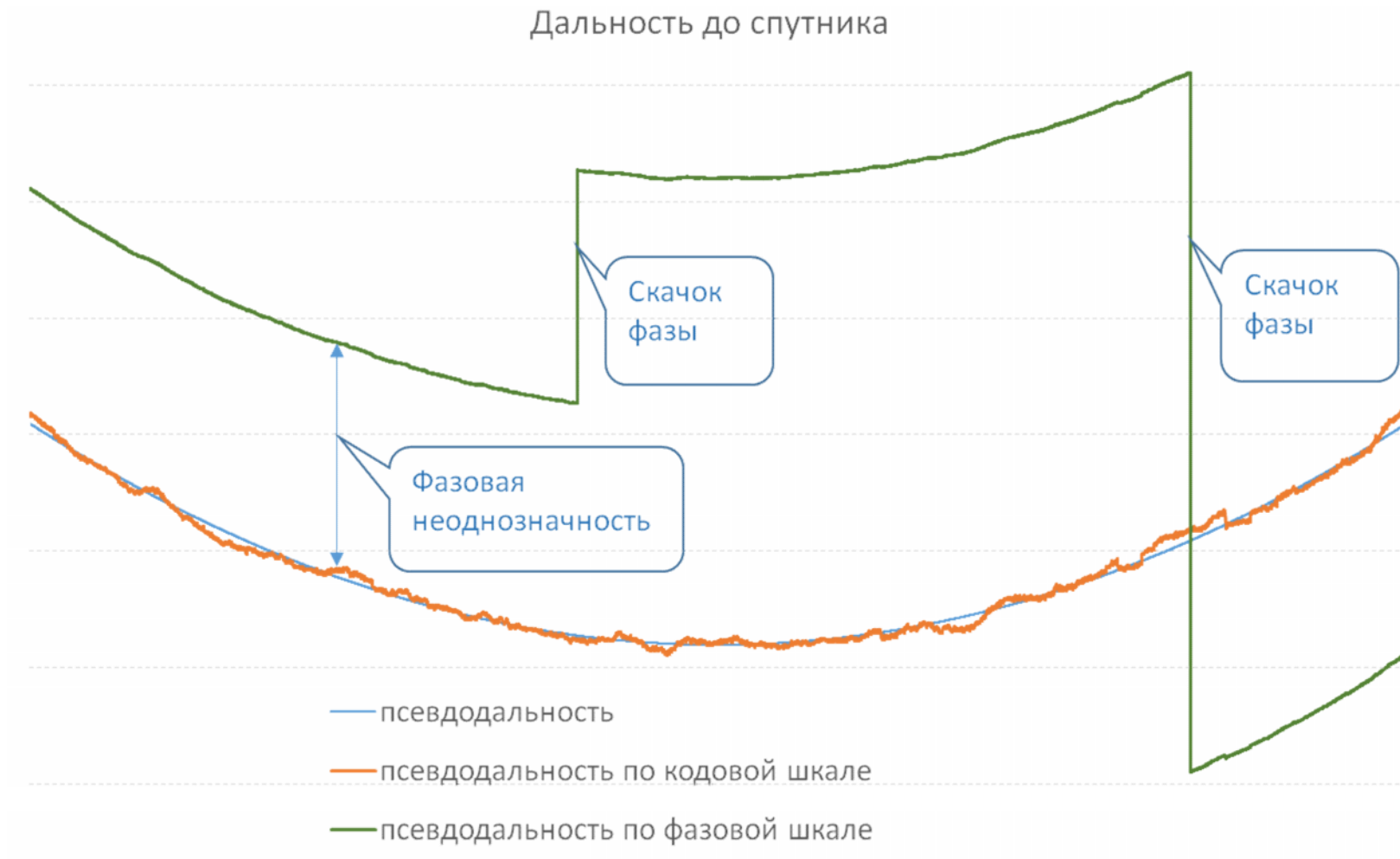
N - целочисленные фазовые неоднозначности.

Навигационные уравнения

$$\nabla \Delta \rho^s = \nabla \Delta \|X_a - X^s\|,$$

$$\nabla \Delta \phi^s = \nabla \Delta \left(\frac{1}{\lambda^s} \|X_a - X^s\| \right) + \nabla f^s \Delta \delta t + \nabla \Delta N^s, \quad \nabla \Delta N^s \in Z^n.$$

Измерения GNSS (2)



Алгоритм навигации (1)

- Поиск и изоляция аномалий в измерениях
- Поиск и изоляция скачков фазы
- Рекуррентное оценивание вещественных значений фазовых неоднозначностей (floating ambiguities)
- Оценка целочисленных значений фазовых неоднозначностей (fixed ambiguities)
- Проверка правильности разрешения неоднозначностей (ambiguity validation)

Алгоритм навигации (2)

$$(IQP) \quad (N - \bar{N})^T D (N - \bar{N}) \rightarrow \min_{N \in Z^n}$$

Разрешение фазовых неоднозначностей - задача
квадратичного программирования

$$(N - \bar{N})^T LL^T (N - \bar{N}) \rightarrow \min_{N \in Z^n}$$

$$\|L^T N - \bar{M}\|^2 \rightarrow \min_{N \in Z^n}$$

$$\|M - \bar{M}\|^2 \rightarrow \min_{M \in \Lambda}$$

Λ - решетка, порожденная базисом L^T .

IQP - поиск вектора решетки, наименее удаленного от
заданного вектора \bar{M}

Алгоритм навигации (3)

Для сокращения перебора перед решением задачи (IQP) решается задача “preconditioning” – редукции целочисленной решетки к короткому базису.

Дерево перебора становится “узким”. Время перебора сокращается с десятков минут (при $n = 30 - 100$) до десятков или сотен миллисекунд.

Алгоритм Lenstra, Lenstra, Lovasz (LLL).

Для решения задачи (IQP) используется алгоритм U. Fincke and M. Pohst == spherical decoder.

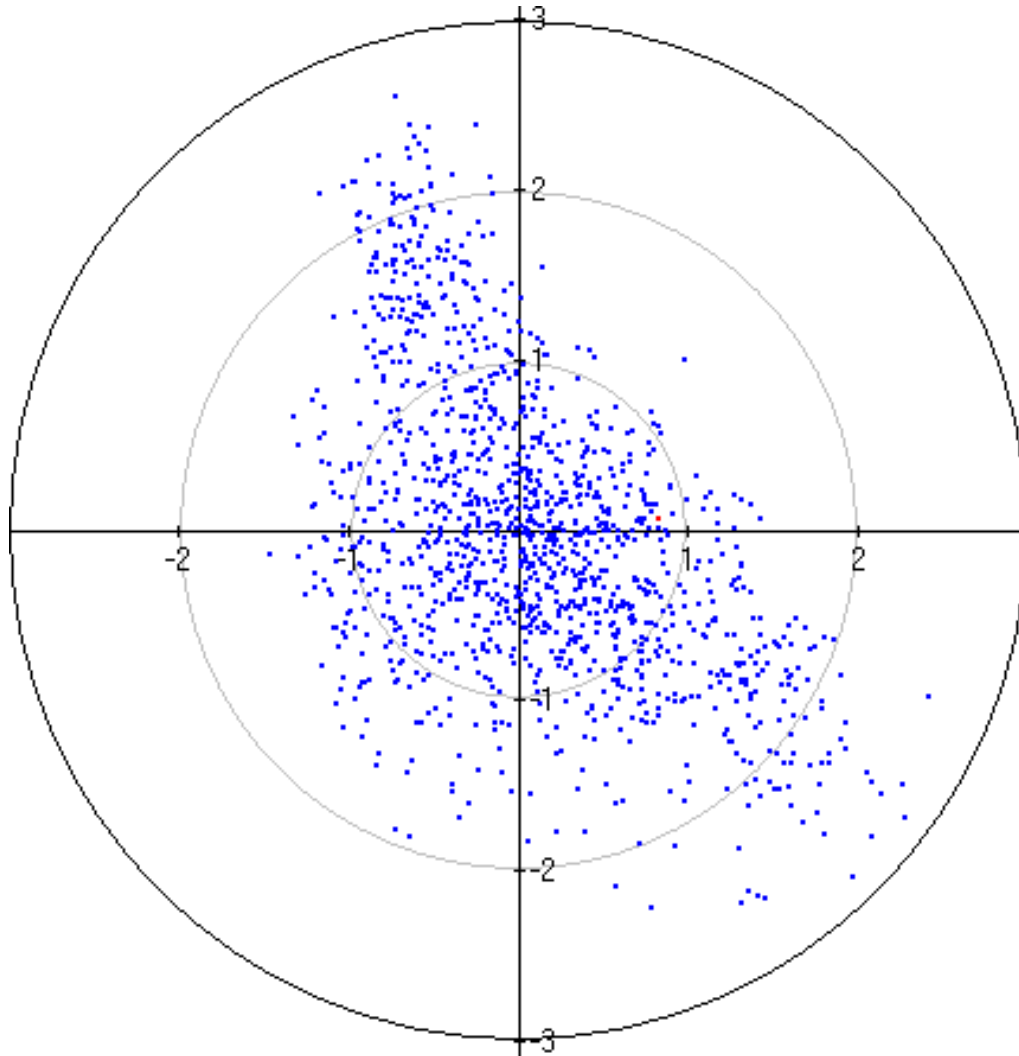
Параллельно рассматриваются многие гипотезы.

Выбирается одна или кластер правдоподобных гипотез.

Передача дифференциальных коррекций в реальном времени

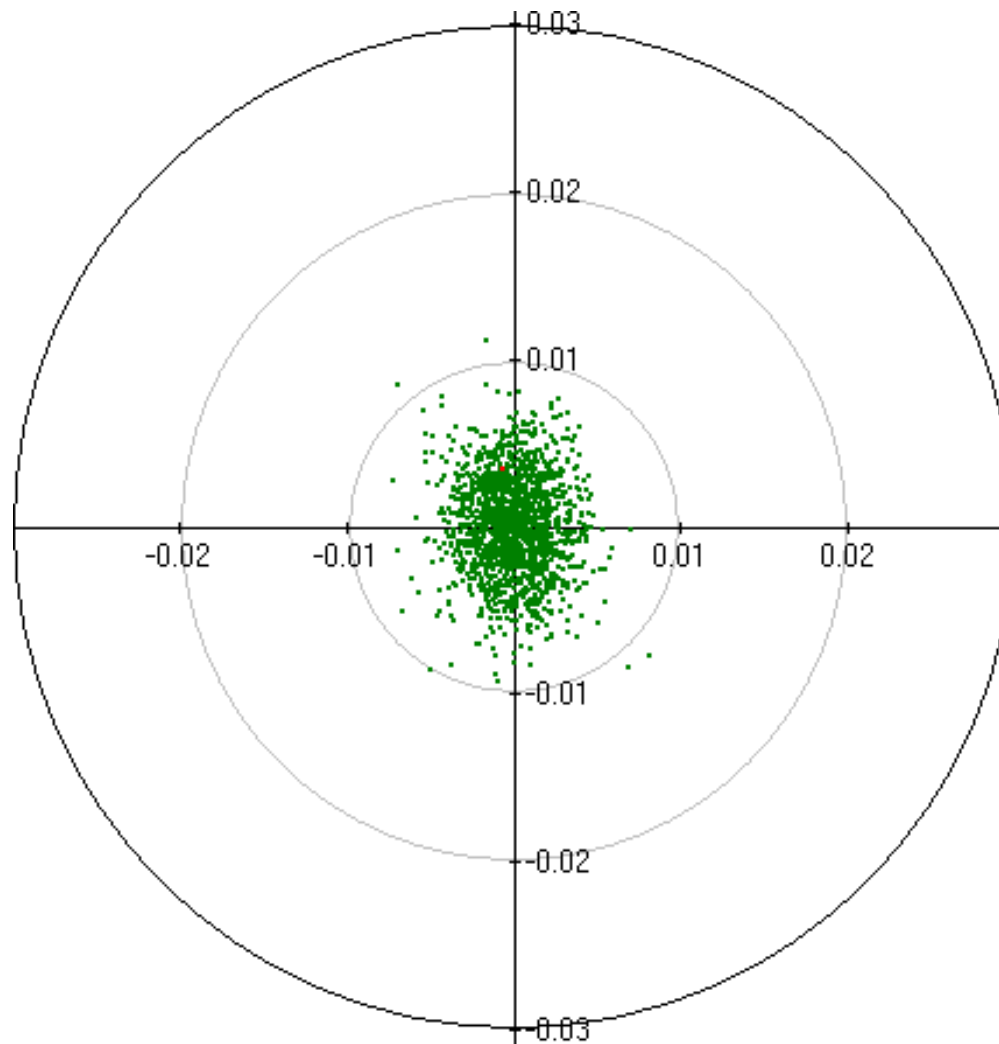


GNSS позиционирование одним приемником, использование грубых (кодовых) измерений



Одночастотный
приемник,
GPS/GLONASS

GNSS позиционирование в фазово-дифференциальном режиме с разрешением фазовых неоднозначностей, использование точных (фазовых) измерений



Состав GNSS

GPS, CDMA

Сигналы: **L1 CA**, L1C, L1P, L2P, L2C and L5

Всего 32 SV's

GLONASS, FDMA

Сигналы: **L1 CA**, L1P, L2P, L2C

Всего 24 SV's

GALILEO, CDMA

В процессе развертывания.

Сигналы: **L1 CA**, L1C, E5a, E5b, E6

В настоящее время 4 спутника

QZSS, CDMA

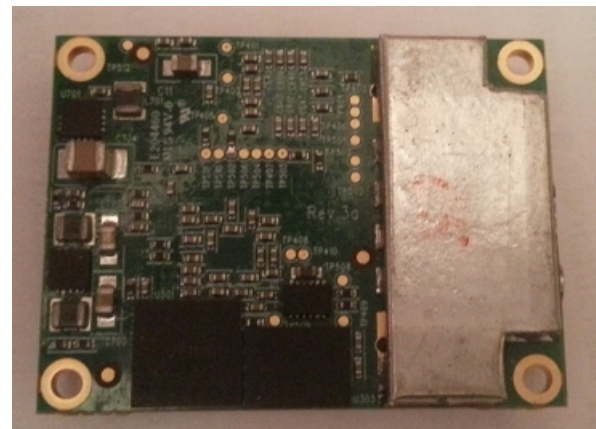
В настоящее время 1 спутник (Michibiki). В перспективе 7

Сигналы: **L1 CA**, L1C, L2C, L5, E6

BEIDOU, CDMA

Три группировки: MEO (30), GEO, IGSO (5)

В процессе развертывания. Сигналы: **B1**, B2, B3



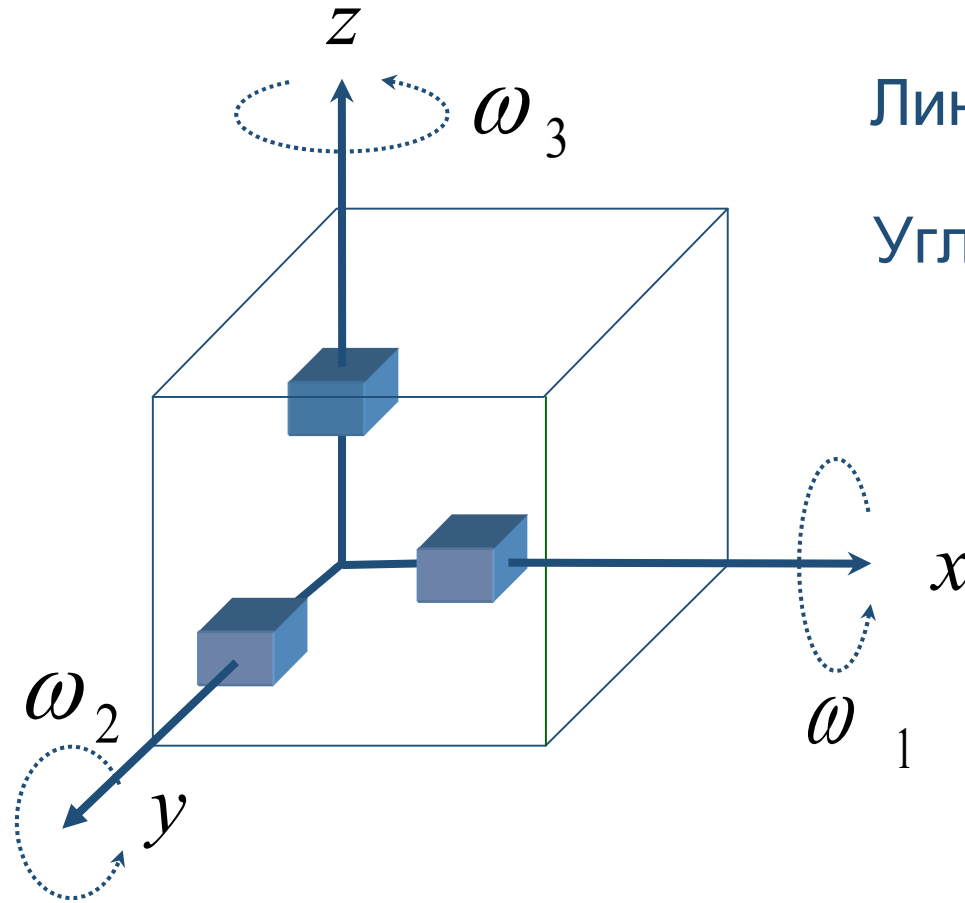
Пример состава GNSS, наблюдаемых в Москве

Status NET-G3A ID:KPJDMRLGOAO

Position SV List Sky Plot Scatter Position In Time Logging

SVC^	USI	EL	AZ	L1C	L1P	L2P	L2C	L5	TC	SS	FCN	SN
GPS	2	32-	60	48	34	34	??	??	48	0		
GPS	8	33+	302	49	35	35	??	??	48	6		
GPS	9	7+	12	39	22	22	42	39	31	0		
GPS	10	17-	36	39	22	23	??	??	48	0		
GPS	20	23-	48	41	24	24	??	??	9	0		
GPS	29	90^	260	36	12	13	35	??	18	0		
GPS	31	33-	266	34	??	??	27	??	21	0		
GLO	44	26+	330	44	43	43	43	??	20	0	-1	12
GLO	47	65-	50	45	45	51	51	??	48	0	2	20
GLO	48	14-	70	44	43	41	42	??	48	0	3	19
GLO	49	56+	272	40	38	37	37	??	6	0	4	21
GLO	50	6-	358	39	38	40	40	??	48	0	5	3
GLO	51	30-	46	43	42	46	46	??	48	0	6	4
QZSS	198	27-	50	43	??	??	??	44	40	0		

Измерения инерциальных сенсоров



Линейные ускорения $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$

Угловые скорости $\omega_1, \omega_2, \omega_3$

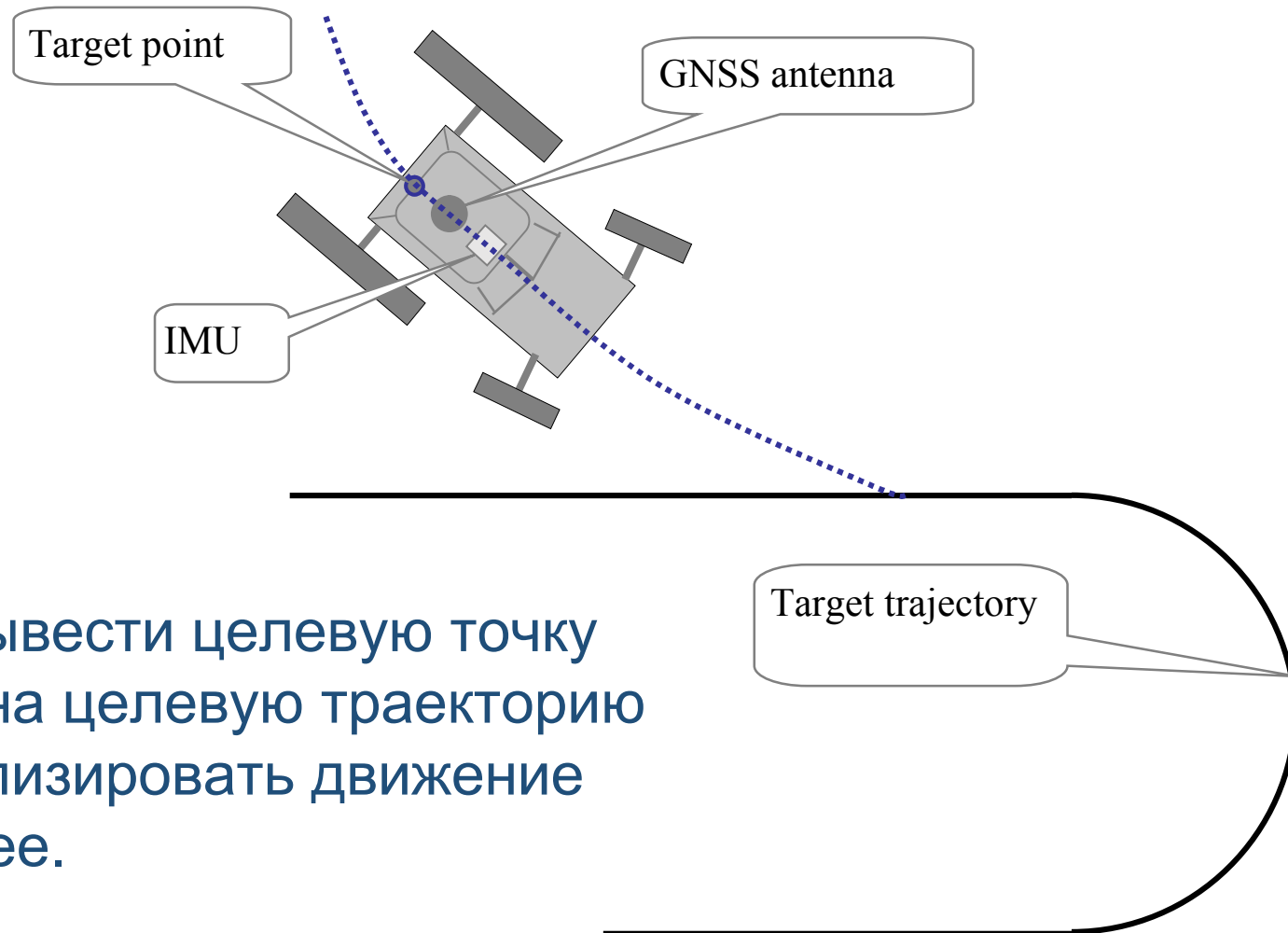
$$\omega = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{pmatrix}$$

$$\omega^\times = \begin{pmatrix} 0 & \omega_3 & -\omega_2 \\ -\omega_3 & 0 & \omega_1 \\ \omega_2 & -\omega_1 & 0 \end{pmatrix}$$

Дешевые микромашинные
бесплатформенные сенсоры,
100 Hz, ~ 0.0001 rad/sec, ~ 0.01 m/sec²



Управление колесным роботом



Цель: вывести целевую точку робота на целевую траекторию и стабилизировать движение вдоль нее.

В зависимости от характера решаемой задачи, требуемая точность реализации траектории составляет 0.02 – 1 м

Планирование пути и автоматическое управление

1. Планирование пути:

- Сбор данных в режиме ручного управления
- Аппроксимация допустимой траектории
- Параметризация и сохранение в памяти контроллера

2. Автоматическое управление:

- Синтез закона управления
- Аппроксимация области притяжения и обратная связь оператору



Синтез закона управления и оценка области притяжения

- Линеаризация обратной связью
- Учет ограниченности управления
- Учет фазовых ограничений
- Аппроксимация области притяжения. Точная область притяжения сложна для анализа.
- Использование методов теории абсолютной устойчивости и LMI

