

Кафедра: физической географии,  
краеведения и туризма

Дисциплина: Основы спутникового позиционирования

# Лекция 3-4

## Счет времени. Основные принципы спутниковой навигации

Мусалимов Р.С.

# Общепринятые единицы мер времени

Принято различать две группы единиц отсчета времени:

- астрономические;
- неастрономические.

Основной астрономической единицей отсчета являются *сутки*, разбитые на 86400 с и равные интервалу времени, за который Земля делает один полный оборот вокруг своей оси относительно некой фиксированной точки отсчета на небесной сфере, для неподвижного наблюдателя, находящегося на поверхности Земли.

**Звёздные сутки** — период вращения какого-либо небесного тела вокруг собственной оси в инерциальной системе отсчёта, за которую обычно принимается система отсчёта, связанная с удалёнными звёздами.

На 2000-й год звёздные сутки на Земле равны  $23^{\text{ч}}56^{\text{мин}}4,090530833^{\text{сек}} = 86164,090530833$  с. Звёздные сутки на 3 мин 56 с. короче средних солнечных суток, звёздный час короче общепринятого на 9.86 с.

Можно выделить более мелкие периоды звёздных суток:

**Звёздный час** — единица времени, употребляемая в астрономии и равная  $1/24$  от звёздных суток. За звёздный час Земля поворачивается на  $15^\circ$  относительно удалённых звёзд, принимаемых за инерциальную систему отсчёта. На 2000 год звёздный час равен  $0\text{ч}59\text{мин}50,1704387847\text{сек}$ .

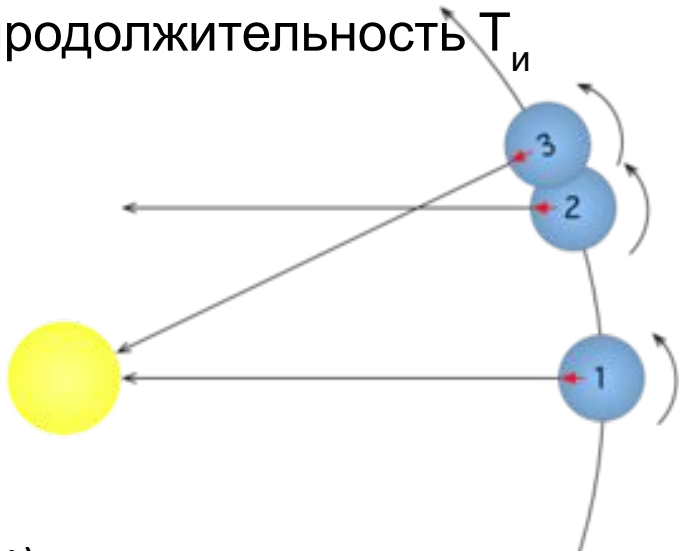
**Звёздная минута** —  $0\text{ч}0\text{мин}59,8361739797451\text{сек}$ .

**Звёздная секунда** —  $0\text{ч}0\text{мин}0,9972695663290856\text{сек}$ .

# Общепринятые единицы мер времени

**Солнечные сутки** — промежуток времени, за который небесное тело совершает 1 поворот вокруг своей оси относительно центра Солнца.

Более строго это интервал времени, отсчитанный по нижним кульминациям центра видимого диска Солнца (истинного Солнца) называют *истинными солнечными сутками*  $T_{и}$ . Поскольку в течение года продолжительность  $T_{и}$



непостоянна, в повседневной жизни за основную единицу времени принимают *средние солнечные сутки*  $T_{ср}$ , соответствует значению  $T_{и}$ , усредненному за год.

Эфемеридное (предвычисленное) время. Из-за упомянутой выше неравномерности суточного вращения Земли продолжительность звездных и солнечных суток незначительно меняется. Для реализации точных расчетов было введено равномерно текущее время - *эфемеридное время ET*, где единицей измерения времени

(1) — начальное положение тела;  
(2) — положение, соответствующее одному обороту вокруг собственной оси;  
(3) — положение по прошествии  $\frac{1}{365.25}$  года, рассчитываемая, как  $\frac{1}{365.25}$  часть среднего продолжительности суток в определенный день 1900 г

является эфемеридная секунда,

# Системы отсчета времени, применяемые в СНС

В основе измерений времени лежит атомное время АТ. Существует **Международное атомное время TAI** (Time Atomic International). В 1967 г., на XIII Генеральной конференции по мерам и весам была принята искусственная единица меры времени, не зависящая от вращения Земли - **атомная секунда**. Атомная секунда равна интервалу времени, в течение которого совершается 9 192 631 770 колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 при отсутствии внешних воздействий. В настоящее время атомная секунда принята за единицу времени в системе СИ вместо применявшейся ранее эфемеридной секунды.

Атомное время течет равномерно и постепенно расходится с так называемым Всемирным временем UT (Universal Time), соответствующим среднему времени Гринвичского меридиана, которое соотнесено с суточным вращением Земли. Различают всемирное время UT:

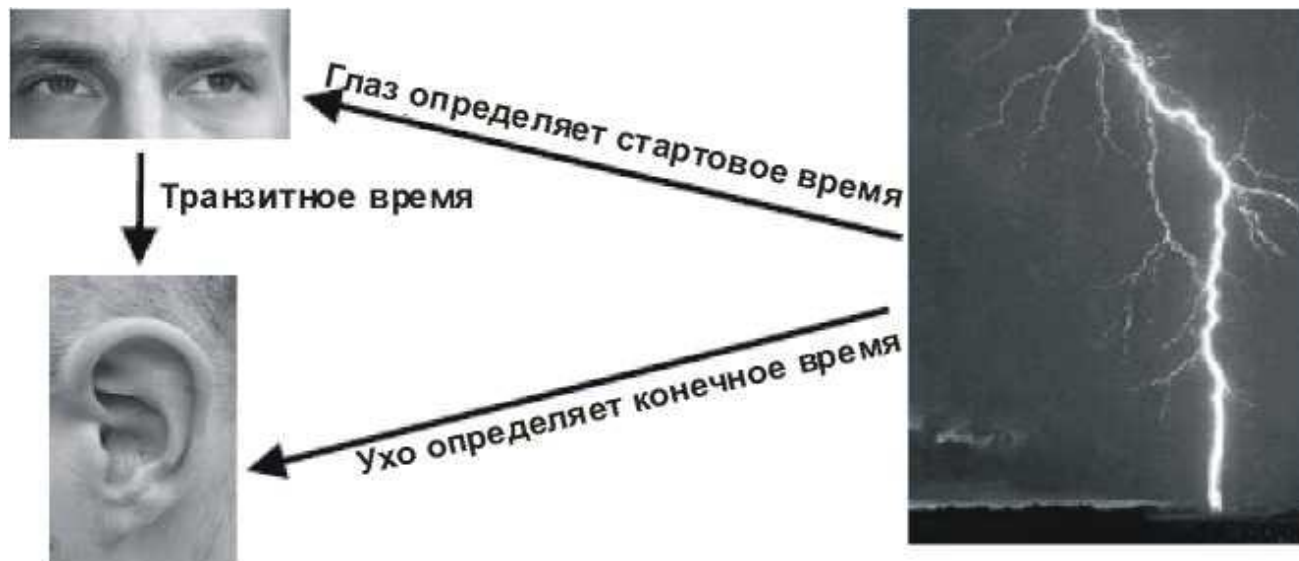
- UT0 - всемирное время, получаемое в результате текущих астрономических измерений относительно неуточненного Гринвичского меридиана;
- UT1 - всемирное время среднего Гринвичского меридиана с учетом движения полюсов. Это время является основой для измерения

# Всемирное координированное время UTC

**UTC (всемирное координированное время)** — атомная шкала времени, аппроксимирующая UT1. Это международный стандарт, на котором базируется гражданское время. В UTC в качестве единицы времени используется секунда СИ, таким образом UTC идёт синхронно с международным атомным временем (TAI).

Обычно в дне UTC 86 400 секунд СИ, однако для поддержания расхождения UTC и UT1 не более чем 0,9 с при необходимости 30 июня или 31 декабря добавляется (или, теоретически, вычитается) дополнительная секунда координации. К настоящему времени все секунды координации были положительными. В случаях, когда точность больше 1 с не требуется UTC можно использовать как аппроксимацию UT1. Таким образом шкала времени UTC в отличие от других версий всемирного времени является равномерной, но зато не является непрерывной. Разница между UT1 и UTC, обозначаемая как DUT1 ( $DUT1 = UT1 - UTC$ ), постоянно отслеживается и еженедельно публикуется на сайте IERS.

# Принцип измерения транзитного времени сигнала



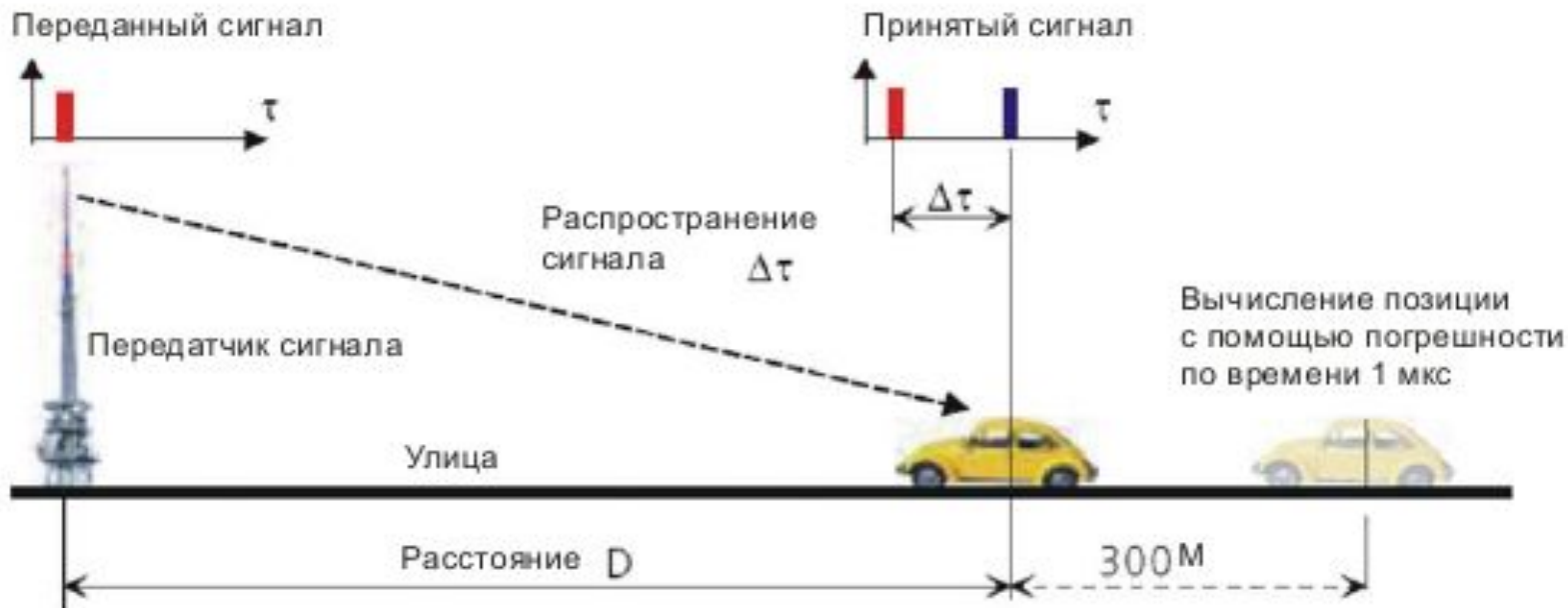
Расстояние = транзитное время \* скорость звука

Система GPS функционирует согласно такому же принципу. Для того чтобы вычислить точную позицию, нужно всего лишь измерить транзитное время сигнала между точкой наблюдения и четырьмя другими спутниками, чьи позиции известны.

# Основные принципы спутниковой навигации

Все спутниковые навигационные системы используют общие принципы определения координат:

- спутники с известной позицией передают регулярный сигнал;
- измеряя время распространения радиоволн (электромагнитные сигналы распространяются со скоростью света  $c = 300'000$  км/с), вычисляется позиция приемника.



Расстояние  $D$  вычисляется путем умножения времени распространения  $\Delta t$  на скорость света  $c$

$$D = \Delta t \cdot c$$

# Основные принципы спутниковой навигации



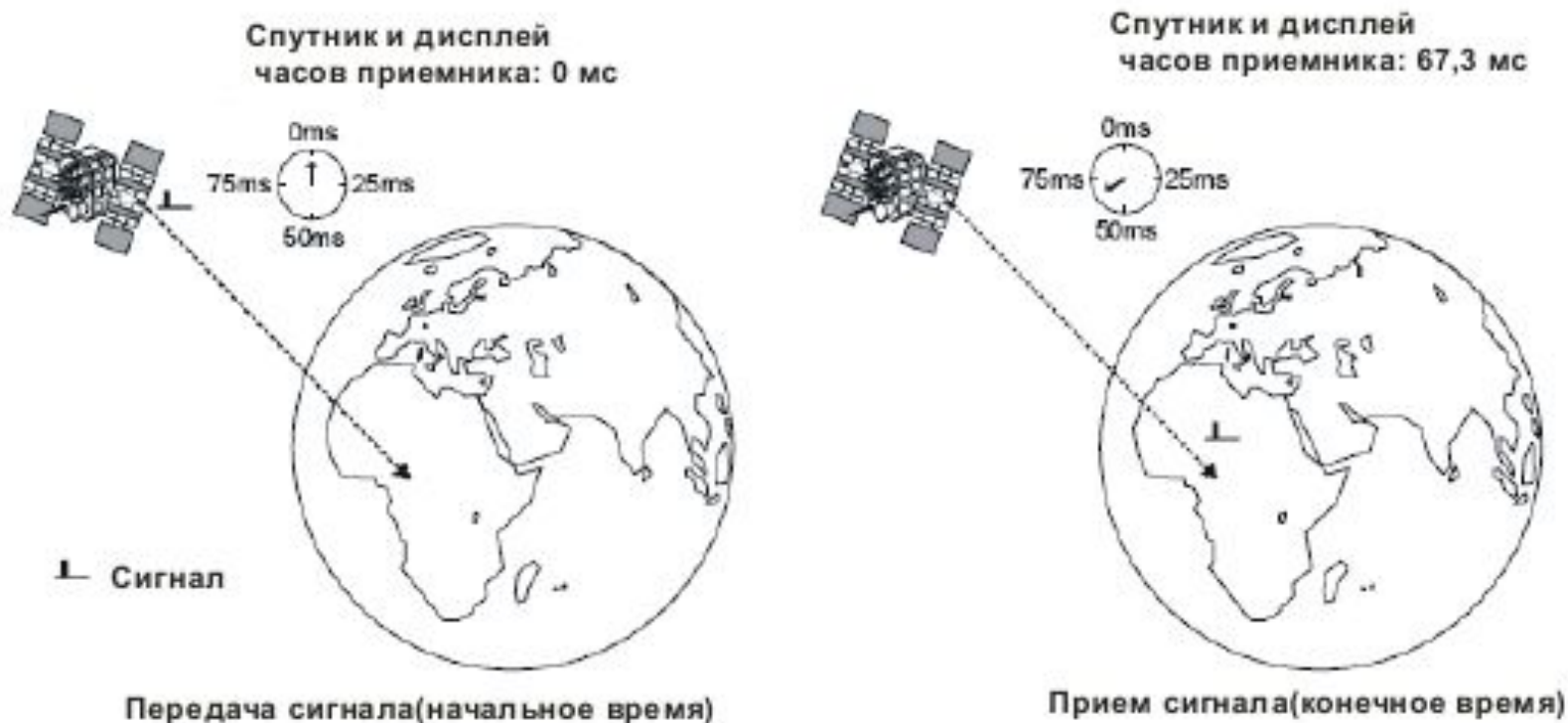
$$D = \frac{(\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2) \cdot c + A}{2}$$

Как видно, чтобы точно вычислить позицию и время вдоль линии (принимая, что линия продолжается только в одном направлении), нам необходимо два передатчика сигналов времени. Из этого мы можем сделать следующий вывод: при несинхронизированных бортовых часах, используемых при расчете позиции, необходимо число передатчиков сигналов времени, превышающее число неизвестных измерений на единицу. Пример:

- На плоскости (два измерения) нам необходимо три передатчика сигналов времени.



# Время прохождения сигнала



Системы спутниковой навигации используют высоко расположенные спутники, которые размещаются таким образом, чтобы из любой точки  $n$  на земле можно было провести линию, по крайней мере, к четырем спутникам.

Сигналы передаются со скоростью света (300,000 км/с) и, следовательно, потребуется приблизительно 67,3 мс для достижения земной поверхности прямо под

# Кодовые измерения

Кодовые наблюдения реализуются в самых простых по конструкции GPS-приемниках. Каждый спутник GPS навигационной системы передает два уникальных кода. Первый и более простой код называется C/A (грубым) кодом. Второй код называется P (точным) кодом. Этими кодами модулируются две несущих волны L1 и L2. L1 несет C/A и P-код, а L2 несёт только P - код. GPS приёмники подразделяются на одночастотные и двухчастотные. Одночастотные приёмники принимают только несущую L1 частоту, а двухчастотные и L1 и L2. Точность определения координат при этом составляет:

- для одночастотного (L1) приемника - 100м;
- для двухчастотного (L1, L2) приемника - 16м.

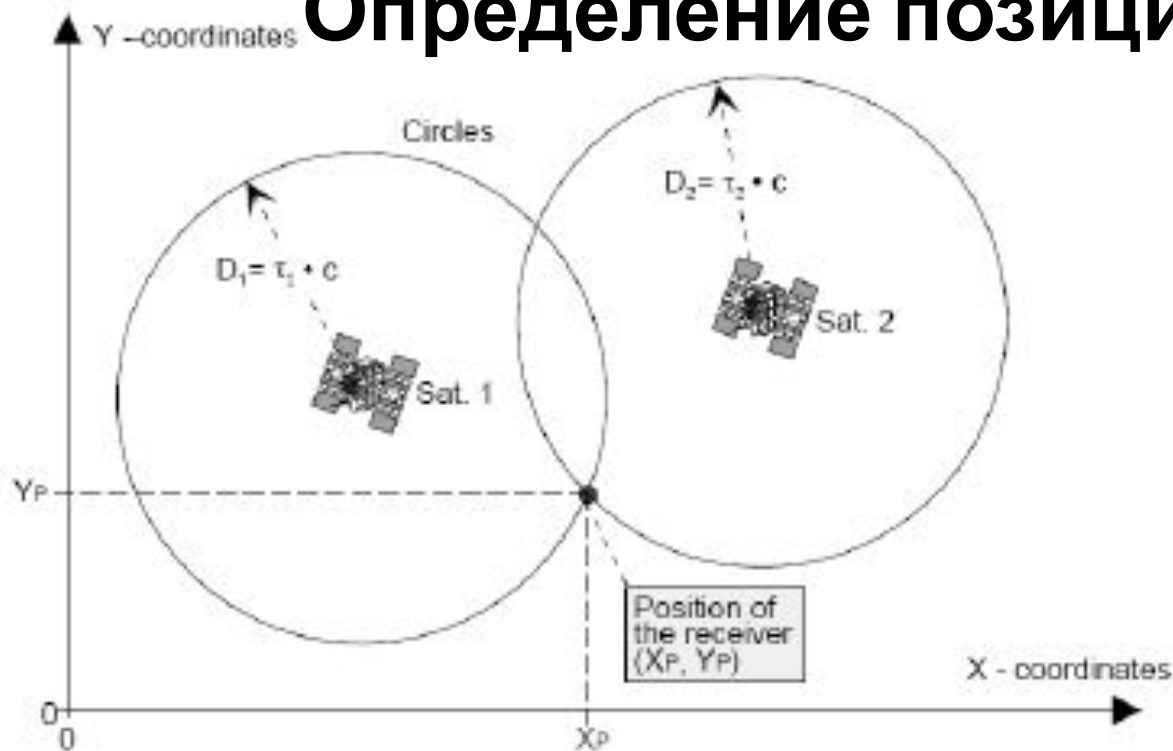
Значения точностей приведены для неблагоприятного режима измерений, когда включен режим “ограниченного доступа” SA.

Несущий сигнал L1 одновременно модулирован обоими C/A и P-кодами, но фазы этих модуляций сдвинуты относительно друг друга на 90°. Сигнал L2 модулирован P-кодом и не несет C/A-кода (планируется ввести и этот код). Оба сигнала L1 и L2 модулированы также данными, посылаемыми с КА. Модуляция такая же - ФМ.

# Характеристики сигналов, передаваемых КА

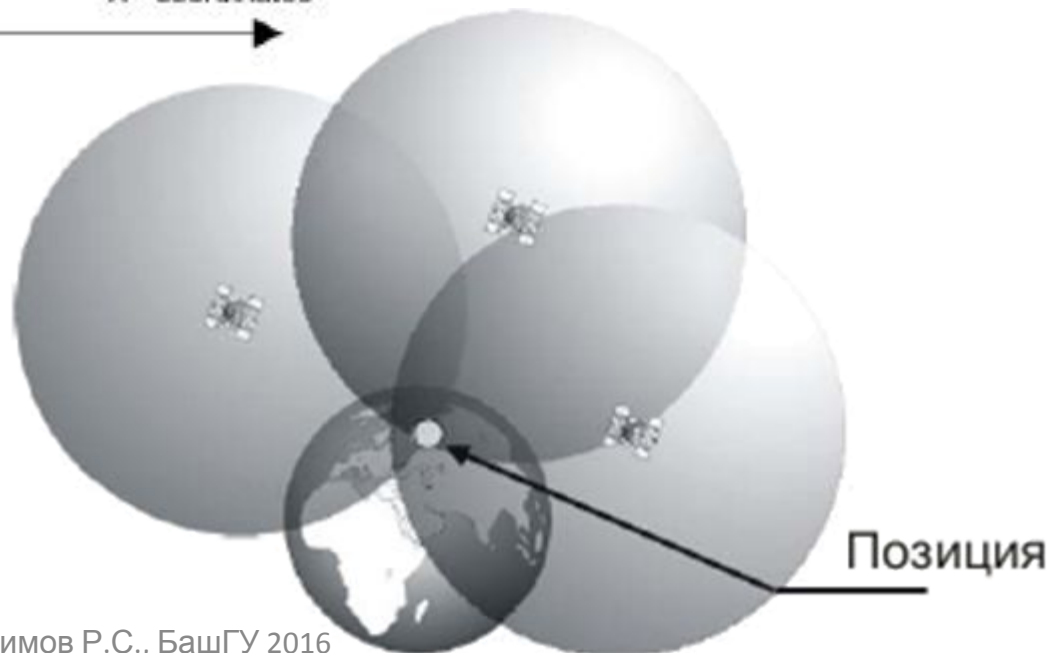
Параметр	ГЛОНАСС	GPS
Поляризация радиоволн	Правая круговая	Правая круговая
Несущие частоты L1	1598,06+1605,38 МГц	1575,42 МГц
Несущие частоты L2	1242,94+1248,62 МГц	1227,6 МГц
Несущая частота L5	-	1176,45 МГц
Разделение сигналов	Частотное	Кодовое
Объем посылки данных	7500 бит	37500 бит
Длительность посылки данных	2,5 мин	12,5 мин
Скорость передачи	50 зн/с	50 зн/с
Повтор меток времени	2с	6с

# Определение позиции на карте



Позиция приемника в на плоскости, определяется в точке пересечения окружностей

Позиция приемника в трехмерном пространстве определяется в точке пересечения трех сфер



# Псевдорасстояние

Показания часов спутника и приемника расходятся на некоторую величину, равную  $\delta^s - \delta_p$ , где  $\delta^s$  – ошибка часов спутника,  $\delta_p$  – ошибка часов приемника. Поэтому измеренное расстояние  $R$  существенно отличается от верного и носит название – **псевдорасстояние**.

Допустим, что ионо- и тропосферная задержки сигнала учтены путем введения соответствующих поправок. Тогда измеренное псевдорасстояние от пункта  $p$  до спутника  $s$  в эпоху (момент времени)  $t$  может быть представ

$$R_p^s(t) = \sqrt{(X^s(t) - X_p)^2 + (Y^s(t) - Y_p)^2 + (Z^s(t) - Z_p)^2} - c(\delta^s(t) - \delta_p(t)),$$

где  $X^s(t)$ ,  $Y^s(t)$ ,  $Z^s(t)$  – координаты спутника в эпоху  $t$ ;  $X_p$ ,  $Y_p$ ,  $Z_p$  – определяемые координаты приемника;  $c$  – скорость света.

Информация о часах спутника передается в составе навигационного сообщения, что дает возможность вычислить ошибку часов спутника на эпоху  $t$  и учесть ее.

Таким образом, для псевдорасстояния  $R_p^s(t)$  имеем уравнение

$$R_p^s(t) = \sqrt{(X^s(t) - X_p)^2 + (Y^s(t) - Y_p)^2 + (Z^s(t) - Z_p)^2} + c\delta_p(t). \quad (10.1)$$

Неизвестными величинами здесь являются  $X_p$ ,  $Y_p$ ,  $Z_p$ ,  $\delta_p(t)$ . Для определения четырех неизвестных необходимо иметь не менее четырех уравнений, то есть в одну эпоху необходимо измерить псевдорасстояния не менее, чем до четырех спутников.

# Фазовые измерения

Фазовые наблюдения выполняются для повышения точности измерений. В этом случае при сравнении принятого со спутника сигнала и его эталона, генерируемого в приемнике, учитывается не только код, но и фаза несущей частоты (L1 или L2). Поскольку период несущей частоты в сотни (для P-кода) и тысячи (для C/A-кода) раз меньше периодов кодовых последовательностей, точность процедуры сравнения значительно повышается, а, следовательно, возрастает точность измерения координат. Однако в этом случае возникает проблема целочисленной фазовой неоднозначности, поскольку отсутствует информация о количестве целых периодов информационного сигнала, укладываемых на пути ИСЗ - приемник. Непосредственно можно измерить только дробную часть фазовой задержки сигнала (в пределах одного периода). Для решения этой проблемы используют несколько способов:

- классический двухэтапный метод измерений;
- модификация классического метода;
- метод замены антенн;
- метод определения неоднозначности “в пути”.

Длины волн L1 и L2 известны, поэтому дальности до спутников можно определить, добавив Номер фазового цикла к общему числу длин волн между спутником и антенной. Определение полного числа циклов несущей (длин волн) между антенной и спутником называется разрешением неоднозначности - поиском целого значения числа длин волн. Для измерений в режиме с постобработкой (PP), который используется для определения местоположения с 50 точностью на уровне сантиметра, это целое значение определяется во время об

# Фазовые измерения

Точные геодезические измерения выполняют на несущих частотах L1 и L2 (в одночастотных приемниках – только на частоте L1). При этом измеряют разности фаз между колебаниями, принятыми от спутника, и колебаниями такой же частоты, выработанными в приемнике.

Уравнение измеренного сдвига по фазе сигнала, принятого от спутника  $s$  на пункте  $p$  в эпоху  $t$ :

$$\Phi_p^s(t) = \frac{1}{\lambda} f^s t - \delta_p^s - \delta^s \left[ \left( \frac{r}{c} \right) - \left( \frac{r_s}{c} \right) \right]$$

Здесь:

$\Phi^s(t)$  – фаза частоты  $f$  ( $f = L1$  или  $f = L2$ ), поступившей на приемник в эпоху  $t$  от спутника  $s$ ;

$\Phi_p(t)$  – фазу собственной такой же частоты приемника в ту же эпоху.

$r$  – расстояние от спутника до приемника;

$\delta^s$  – ошибка часов спутника;

$\delta_p$  – ошибка часов приемника.

$N$  – целое число периодов, остается постоянным для всех расстояний от пункта  $p$  до спутника  $s$

$f^s = c/\lambda$  – частота излучения.

# Фазовые измерения

Разности фаз измеряют с высокой точностью, соответствующей долям миллиметра. Однако вычислить решением системы уравнений (10.5), составленных по результатам фазовых измерений, координаты приемника с указанной точностью не удастся из-за ошибок орбиты, влияния ионосферы и других причин.

Точность фазовых измерений реализуют, применяя *метод относительного определения положения пунктов*. Результаты одновременных наблюдений одного и того же спутника в двух пунктах содержат значительные, но общие, близкие по величине погрешности. Поэтому разности результатов измерений от них практически свободны и позволяют с высокой точностью определять разности координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  двух пунктов, то есть трехмерный вектор  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ , их соединяющий. Следовательно, зная координаты  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  одного пункта, можем, определив разности координат  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  до другого, вычислить и его координаты.

Фазовые измерения в геодезических работах являются основными, обеспечивая возможность построения геодезических сетей высокой точности.



# Релятивистский эффект частоты

Он возникает по двум причинам: большой скорости движения спутника и различия гравитационного потенциала на спутнике и на Земле. На быстро движущемся спутнике происходит замедление течения времени. Относительное значение частоты уменьшается на  $-4,4 \cdot 10^{-10}$ . Поэтому основная частота на спутнике преуменьшается и устанавливается в ГЛОНАСС смещенной на  $\Delta f = -2,18 \cdot 10^{-3}$  Гц, а в GPS - на величину  $\Delta f_0 = -4,57 \cdot 10^{-3}$  Гц. Эффект из-за различия гравитационных потенциалов на спутнике и на Земле учитывается поправкой, зависящей от эксцентриситета орбиты. При эксцентриситете  $-0,02$  погрешность в дальности будет  $-14$  м.

Влияние релятивистского эффекта может быть разделено на две части. Одна из этих частей компенсируется смещением основной частоты  $f_0$ . В навигационном сообщении передается поправка, учитывающая отклонение фактической частоты спутникового эталона от требуемой его настройки и отклонение орбиты спутника от номинальной. Другая часть этого эффекта является одинаковой для всех каналов спутникового приемника и входит в качестве постоянной составляющей в определяемые псевдодальности и псевдоскорости. Причем по этой причине в средних широтах псевдодальности могут отличаться от дальностей до  $17-25$  м.

# Целостность системы

Целостность системы. Важная характеристика работоспособности системы. Целостность - способность системы обеспечить пользователя своевременными предупреждениями в случае, когда систему нельзя использовать. Фактически идет речь о информации о состоянии и неисправностях спутников. Меры по обеспечению целостности принимаются как на спутниках, так и на Земле. В приемник поступают сигналы о пригодности или непригодности КА. Важной мерой является использование избыточного числа спутников и отбраковки измерений, поступающих от неисправных КА. На Земле организуются службы мониторинга, основной задачей которых является оперативное определение характеристик навигационного поля, выявление сбоев и оповещение о них пользователей