

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° относительно удалённых звёзд, принимаемых за инерциальную систему отсчёта. На 2000 год звёздный час равен $0\text{ч}59\text{мин}50,1704387847\text{сек}$.

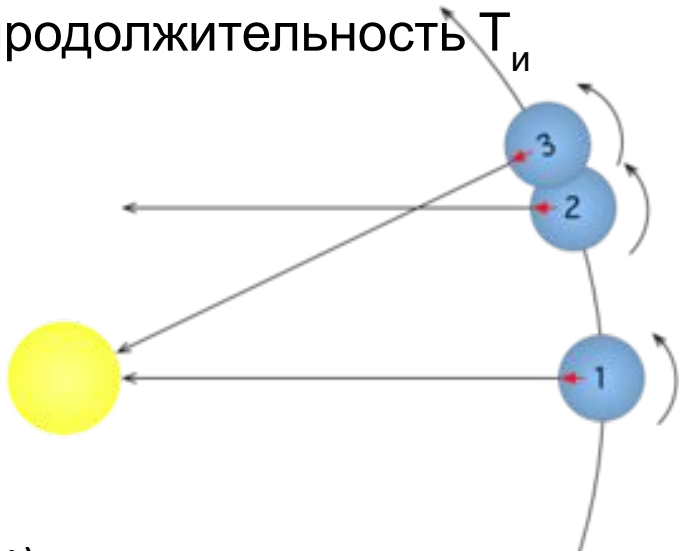
Звёздная минута — $0\text{ч}0\text{мин}59,8361739797451\text{сек}$.

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 $T_{и}$



(1) — начальное положение тела;
(2) — положение, соответствующее одному обороту вокруг собственной оси;
(3) — положение по прошествии одного солнечного суток, рассчитываемая, как 1/86400 от определенного дня 1900 г

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 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:

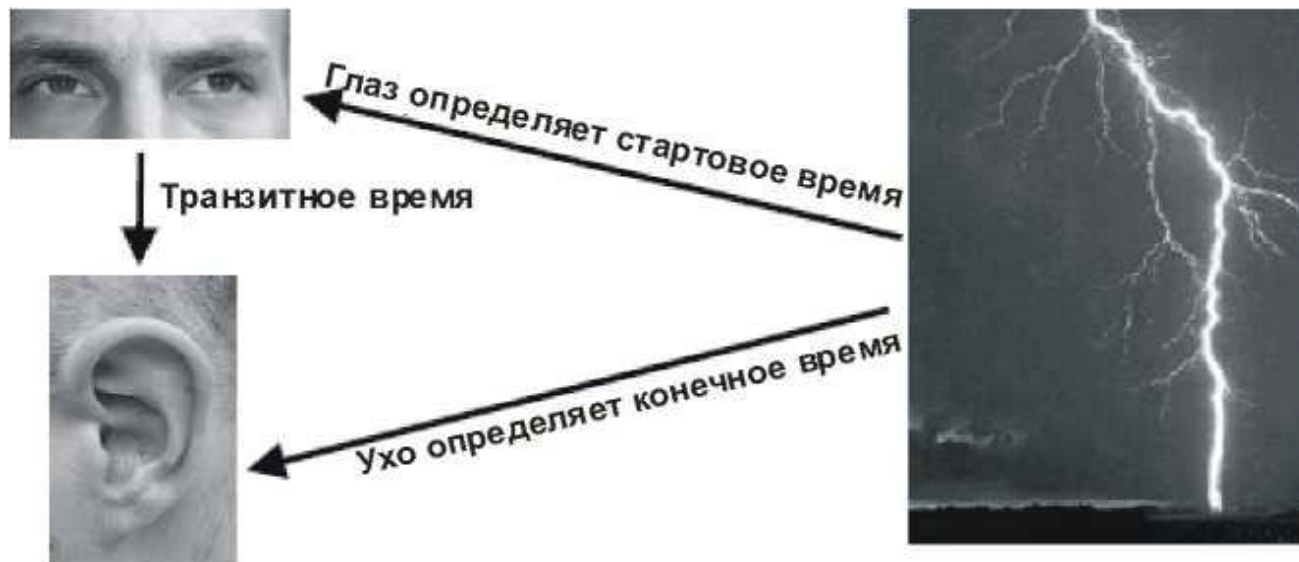
- UT0 - всемирное время, получаемое в результате текущих астрономических измерений относительно неуточненного Гринвичского меридиана;
- UT1 - всемирное время среднего Гринвичского меридиана с учетом движения полюсов. Это время является основой для измерения

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



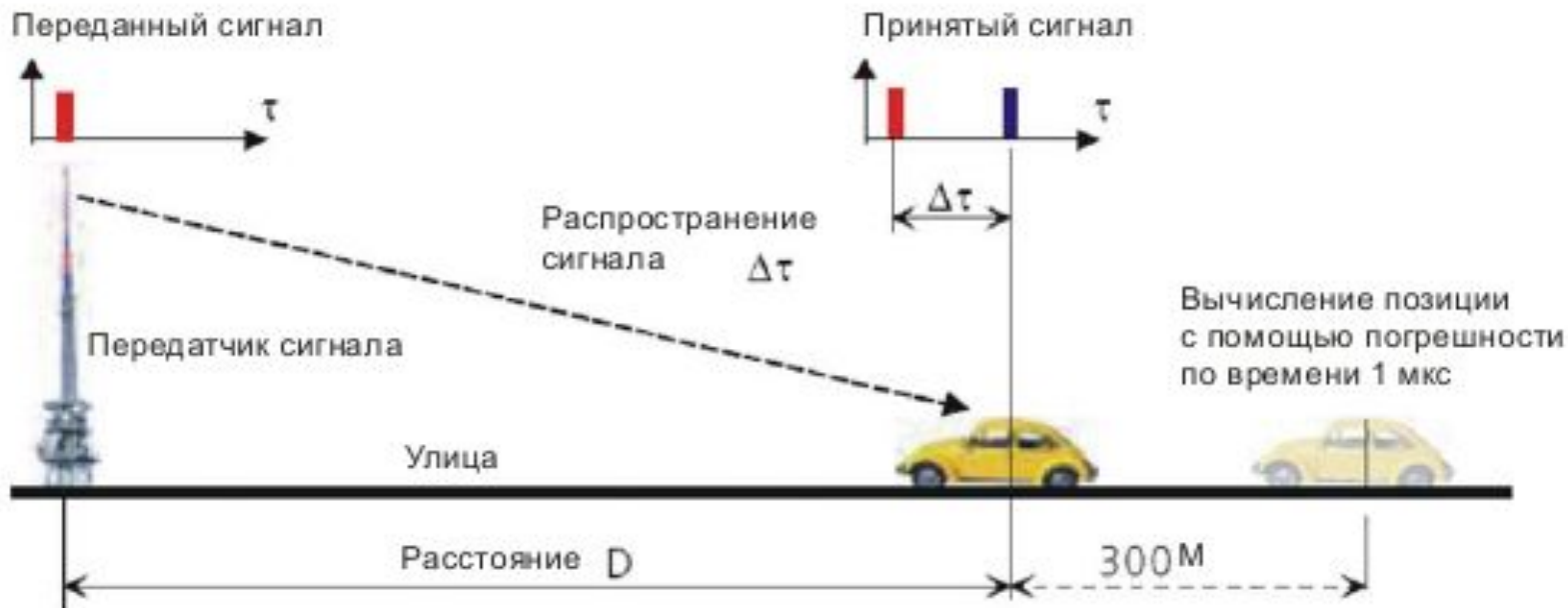
Расстояние = транзитное время * скорость звука

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 Δt на скорость света c

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

Основные принципы спутниковой навигации

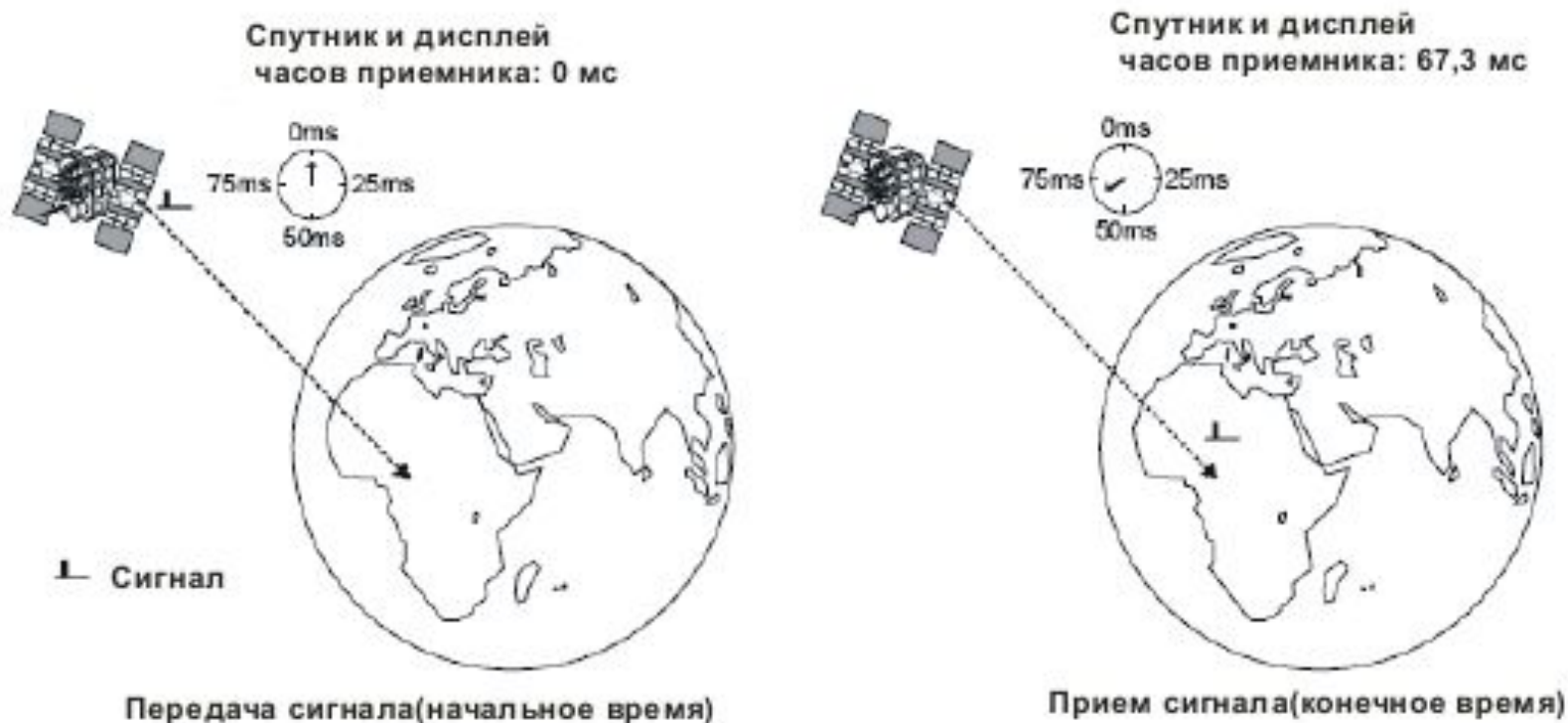


$$D = \frac{(\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2) \cdot c + A}{2}$$

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.

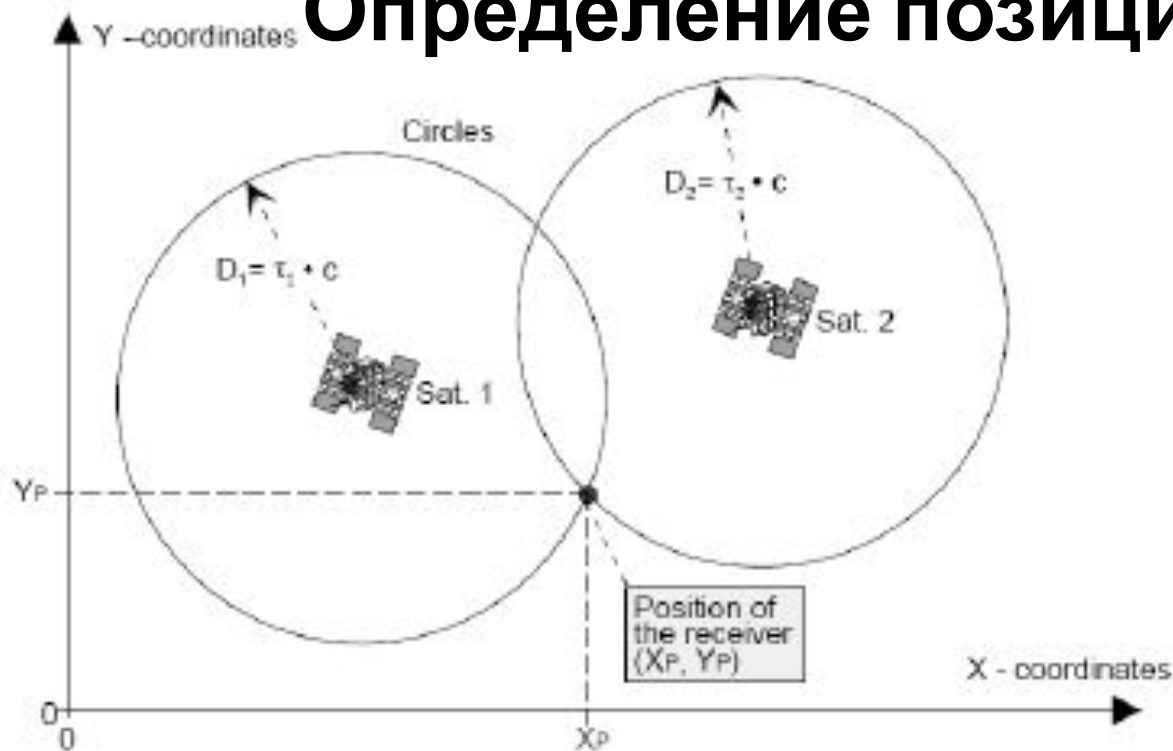
Значения точностей приведены для неблагоприятного режима измерений, когда включен режим “ограниченного доступа” SA.

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

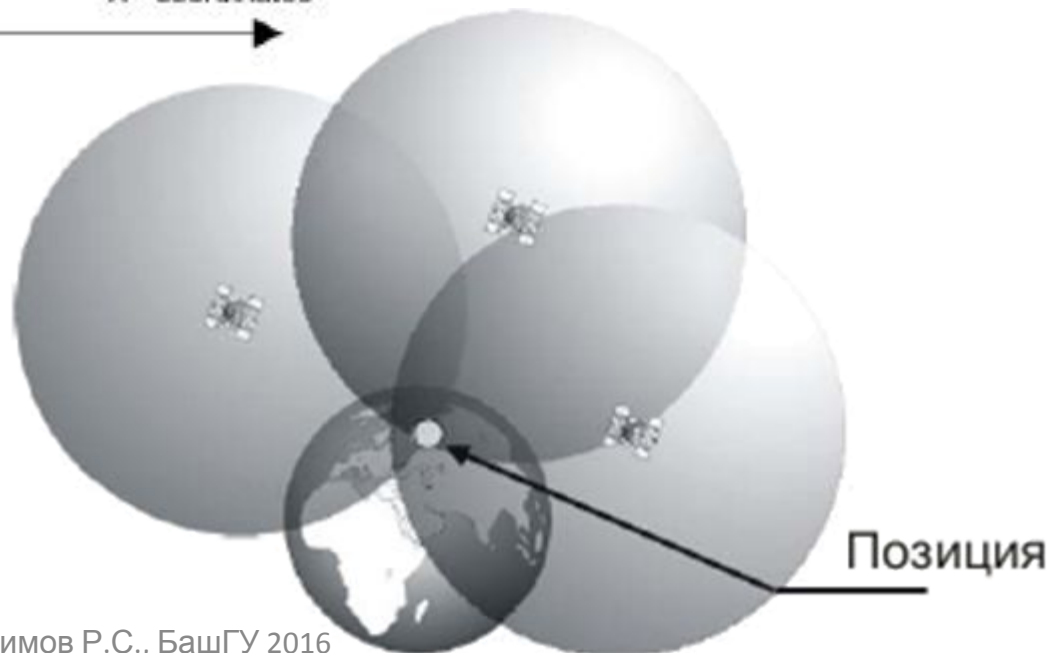
Параметр	ГЛОНАСС	GPS
Поляризация радиоволн	Правая круговая	Правая круговая
Несущие частоты L1	1598,06+1605,38 МГц	1575,42 МГц
Несущие частоты L2	1242,94+1248,62 МГц	1227,6 МГц
Несущая частота L5	-	1176,45 МГц
Разделение сигналов	Частотное	Кодовое
Объем посылки данных	7500 бит	37500 бит
Длительность посылки 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 δ^s – ошибка часов спутника, δ_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

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;

δ^s – ошибка часов спутника;

δ_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 ΔX , ΔY , ΔZ , их соединяющий. Следовательно, зная координаты X , Y , Z одного пункта, можем, определив разности координат ΔX , ΔY , ΔZ 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