



Егошин А.В., Моторов М.Н.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ СИСТЕМ РАДИОНАВИГАЦИИ GPS И ГЛОНАСС НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРИХОДА СИГНАЛОВ СО СПУТНИКА

Аннотация: При навигации объектов используют системы радионавигации NAVSTAR или GLONAS. В обеих системах используется один и тот же принцип – определения расстояния от спутников до объекта. Измерения расстояния проводят измерением времени распространения сигнала от спутников до объекта. Для этого приёмник генерирует псевдослучайный код в тот же момент, что и спутник передает сигнал. При принятии сигнала приёмником, приёмник вычисляет время распространения сигнала как разность времени генерации псевдослучайного кода и временем принятия сигнала. В связи с этим возникает необходимость синхронизации часов спутника и приёмника. Из-за аппаратных возможностей, не все приёмники могут быть синхронизированы с часами спутников. Методы исследования основываются на анализе систем радионавигации, его структуры, принципов функционирования и существующих методов определения координат объекта. В данной статье предлагается новый способ определения координат, основанный на измерении разности времени прихода сигналов от спутников. Благодаря этому больше не требуется четкая синхронизация часов приёмника и часов спутника, выявления момента передачи сигнала со спутника к приёмнику и использование корректирующих систем. **Ключевые слова:** GPS, задержка, трилатерация, определение координат, спутниковая навигация, ГЛОНАСС, корректирующие системы, радионавигация, WAAS, разностно-дальномерный способ

Введение.

Глобальные системы позиционирования NAVSTAR и российская система радионавигации ГЛОНАСС передают синхронную информацию во всем мире с точностью атомных часов. Каждый спутник генерирует и передаёт уникальное вседоступное сообщение каждую 1 мс. В данном сообщении зашифрована информация о спутнике и времени.

Приняв данный сигнал, приемник вычисляет навигационное решение. Рассчитывается навигационное решение путем трилатерации, где приёмник измеряет расстояние от четырех или более спутников: один для каждого решения пространства-времени. Далее приёмник вычисляет координаты своего местоположения.

Измерение расстояния от спутника до приёмника происходит следующим образом:

1. Спутник передает сообщение (информация о спутнике и времени).
2. Приёмник измеряет время прохождения сигнала как разность времени, пришедший со спутника с сообщением, и временем собственных часов.
3. Рассчитывается расстояние от спутника до приёмника.

Спутники оснащены атомными часами, имеющие высокую точность. Но не все приёмники оснащены атомными часами. В основном они содержат кварцевые часы, имеющую меньшую точность. Также часы спутников и приёмников должны быть синхронизированы. Расхождение между часами спутников и приёмников в 1 мкс даёт ошибку в измерении расстояния в 300 м.

Для решения данной задачи были разработаны система WAAS и российская система СДКМ, использующие наземные станции. Но данные системы жестко привязаны к местности и имеют ограничения в распространении сигналов.

В данной статье будет рассмотрен способ определения координат приёмника измерением разности прихода сигналов к приёмнику от различных спутников. Данный способ позволит отказаться от базовых станций и тем самым повысить надежность систем радионавигации GPS и ГЛОНАСС.

Время.

Как было ранее сказано система NAVSTAR и ГЛОНАСС функционируют в собственном системном времени. Все процессы измерений фиксируются в этой шкале времени. Требуется согласованность шкал времени используемых спутников. Это достигается за счет привязки к системному времени.

Системное время-это Всемирное координированное время (UTC) отнесенное к началу 1980 г [3]. Система ГЛОНАСС также периодически подстраивается под Всемирное координированное время.

Принцип определение местоположения.

GPS и ГЛОНАСС основана на местоопределении по расстояниям до спутников. Следовательно, координаты объекта на Земле определяются на основе измерений расстояний до группы спутников. Спутники при этом выполняют роль точно координированных точек отсчета.

Для нахождения координат объекта требуется четыре спутника рис.1. Предположим, нам известно расстояние до первого спутника и вокруг него можно описать сферу заданного радиуса, равную измеренному расстоянию до первого спутника (Рис.1 а). Вокруг

второго спутника также можно описать сферу заданного радиуса, равную измеренному расстоянию до второго спутника. Определяемое местоположение будет где-то в круге, задаваемом пересечением двух сфер (Рис.1 б). Вокруг третьего спутника можно описать сферу радиусом, равную измеренному расстоянию до третьего спутника. Пересечение трех сфер дает две точки на окружности (Рис.1 в). Четвёртая сфера вокруг четвертого спутника позволяет окончательно определить местоположение точки [2] [6].

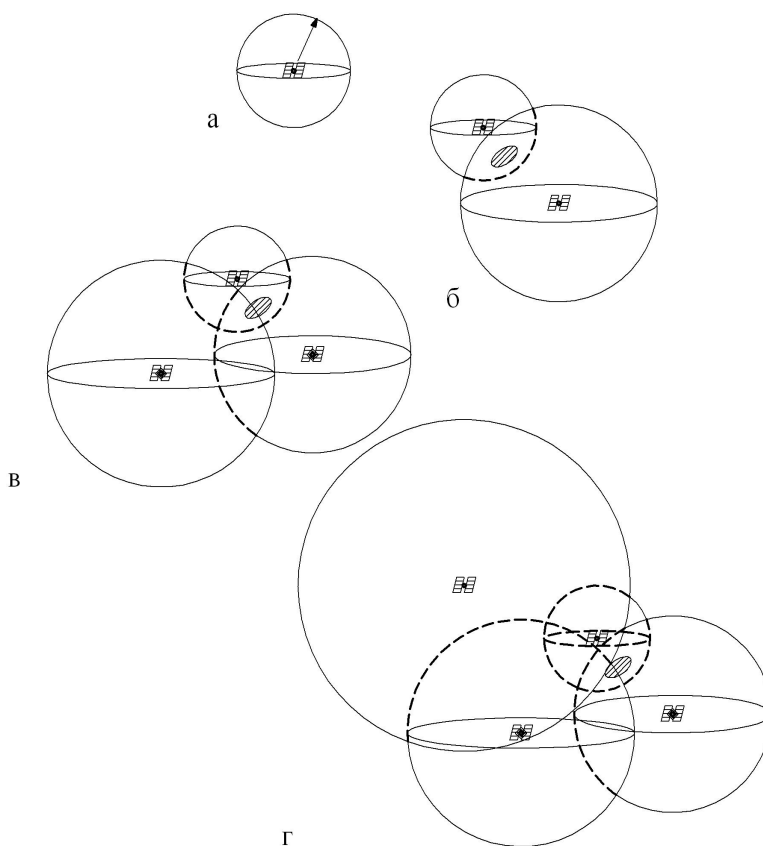


Рис. 1. Определения координат объекта

Методы определения координат.

Определение координат по наблюдениям спутников навигационных систем выполняется абсолютным, дифференциальным и относительным методами. В абсолютном методе координаты получаются одним приёмником. При этом реализуется метод засечки положения приёмника от известных положений космических аппаратов.

В дифференциальном и относительном методах наблюдения производят не менее двух приёмниками, один из которых располагается на опорном пункте с известными координатами, а второй совмещен с определяемым объектом. В дифференциальном методе по результатам наблюдений на опорном пункте отыскиваются поправки к соответствующим параметрам наблюдений для неизвестного пункта. Т.е. наблюдения обраба-

тываются отдельно. Этот метод обеспечивает мгновенное решение. В нем достигается более высокая точность, чем при абсолютном методе, но только по отношению к опорной станции. В относительном методе наблюдения, сделанные одновременно на опорном и определяемом пункте, обрабатываются одновременно. Это основное различие между относительным и дифференциальным методами.

Точность дифференциального и относительного метода намного выше, чем при абсолютном методе. Однако следует обратить внимание на два момента. Во-первых, в этих методах координаты неизвестных пунктов находятся относительно опорного пункта, то погрешности опорного пункта полностью войдут в координаты определяемых точек, то есть вся развиваемая сеть оказывается смещенной. Во-вторых, поскольку координаты определяемых пунктов используются для вычисления компонент базовых линий, то это также будет сказываться на точность определения приращения координат между опорной станции и определяемым местом.

Абсолютный метод определения координат.

В абсолютном методе приёмник определяет свои координаты, скорость и время по спутникам СРНС независимо от других приёмников. Основным параметром, по которому определяются координаты, является псевдодальность P .

$$P_A^i = p_A^i + cdt_A - cdt^i + I_A^i + T_A^i + d_A + d^i + dm_A^i + e_A^i$$

Нижний индекс A относится к пункту наблюдения, а верхний индекс i – к спутнику. p_A – геометрическая дальность; dt_A и dt^i – сдвиги шкал часов для приёмника и для спутника; I и T – ионосферная и тропосферная задержки; d_A и d^i – задержки в аппаратуре приёмника и спутника соответственно; dm – влияние многопутности; e – случайная ошибка измерения (шум); c – скорость распространения света в вакууме.

Задержки сигналов в аппаратуре спутников определяются путем калибровок и вообще не учитываются, они входят в шумы измерений.

Геометрическая дальность p_A представляет собой расстояние между спутником и приёмником:

$$p_A^i = \sqrt{(X^i - X_A)^2 + (Y^i - Y_A)^2 + (Z^i - Z_A)^2}$$

Дифференциальный метод определения координат.

При дифференциальном режиме используются не менее двух приёмников, измеряющие псевдодальности. Один из приёмников постоянно установлен в пункте с известными координатами. Его называют опорной станцией. Второй приёмник находится в точке, координаты которого необходимо определить.

Суть дифференциального метода сводится к тому, что приёмник опорной станции

определяет из наблюдений спутников поправки для координат и псевдодальностей, передают по радиоканалу данные поправки мобильному приёмнику. Мобильный приёмник исправляет свои параметры и в результате получает точные координаты.

Относительное позиционирование.

Целью относительного позиционирования является определения координат неизвестной точки по отношению к известной точке, которая является стационарной. Другими словами, относительное позиционирование нацелено на определении вектора между двумя точками, которые часто называют вектором базовой линии или просто базовой линией.

Относительное позиционирование требует одновременного выполнения наблюдений на опорной станции и на неизвестной точке [7].

Измерение расстояния от спутника до приёмника.

Расстояние от спутников определяется по измерениям времени прохождения сигнала до приёмника, умноженным на скорость света (Рис. 2). Для определения времени распространения сигнала необходимо знать время его передачи со спутника. Для этого на спутнике и в приёмнике генерируется одинаковый псевдослучайный код. Приёмник проверяет, пришедший сигнал со спутника, и определяет время генерации такого же кода. Полученная разница, умноженная на скорость света, дает расстояние от спутника до приёмника [1].

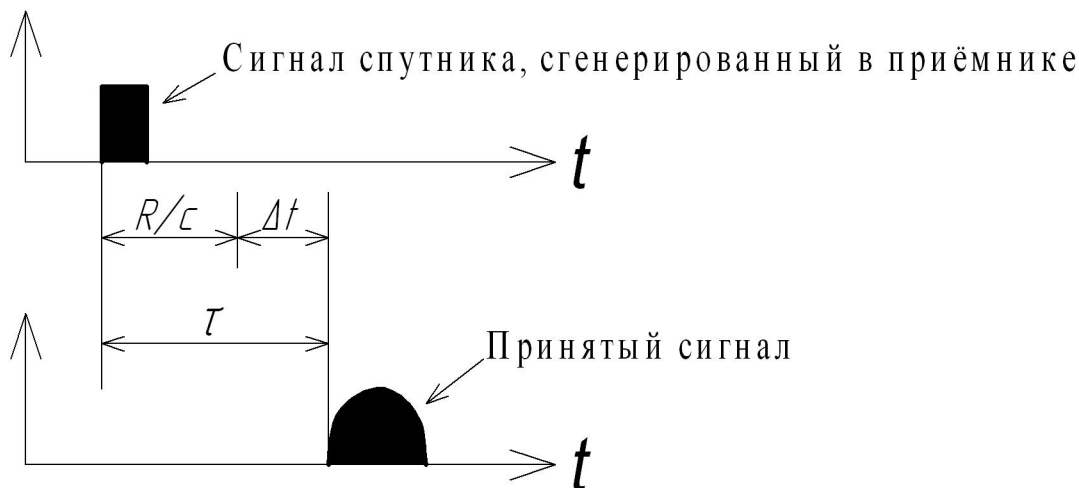


Рис. 2. Измерение времени прохождения сигнала

- τ – время, измеряемое приёмником;
- Δt – разность хода часов спутника и приёмника;
- R – расстояние от спутника до приёмника;

c – скорость света;

R/c – время распространения сигнала от спутника до приёмника.

Из выше перечисленного видно, что точность измерения расстояния напрямую зависит от точности и синхронности хода часов на спутнике и в приёмнике.

Для повышения точности была разработана система дифференциальной коррекции. Система дифференциальной коррекции реализуется с помощью контрольного GPS приёмника, называемого базовой станцией. Она располагается в пункте с известными координатами, в том же районе, что и основной GPS приёмник. Базовая станция непрерывно отслеживает каждый спутник. Это обусловлено тем, что базовая станция должна принять сигнал со спутника раньше, чем основной приёмник. Сравнивая известные координаты с измеренными, базовая станция вырабатывает поправки, которые передает основному приёмнику. Поправки, принятые с базовой станции, автоматически учитываются в основном приёмнике при измерениях расстояний от спутников до приёмника [4] [7].

Результаты, полученные с помощью системы дифференциальной коррекции, напрямую зависят от расстояния от базовой станции до приёмника потребителя.

Измерение расстояния.

Предположим, имеется два источника сигнала. Между этими двумя источниками можно провести прямую линию и приёмник находится между этими двумя источниками на прямой. Это дает нам один частный случай, когда сигналы с обоих источников придут одновременно. Следовательно, приемник будет находиться на одинаковом расстоянии от обоих источников. Предположим, что приёмник находится от первого источника на расстоянии R_1 , а от второго источника на расстоянии R_2 . Тогда сигнал от первого источника придет раньше, чем от второго источника на время Δt .

$$\Delta t = t_1 + t_2$$

где t_1 – время, которое необходимо пройти сигналу от первого источника до приёмника;

t_2 – время, которое необходимо пройти сигналу от второго источника до приёмника.

Расстояние R_1 :

$$R_1 = \frac{R}{2} - V \times \frac{\Delta t}{2},$$

V – скорость распространения сигнала.

А расстояние R_2 :

$$R_2 = \frac{R}{2} + V \times \frac{\Delta t}{2}$$

Теперь рассмотрим случай на плоскости. Имеется три источника с заданными координатами: $A(x_A, y_A)$, $B(x_B, y_B)$, $C(x_C, y_C)$ (Рис.3). Через любые три точки на плоскости не лежащие на одной прямой можно провести окружность с центром $O(x_O, y_O)$.

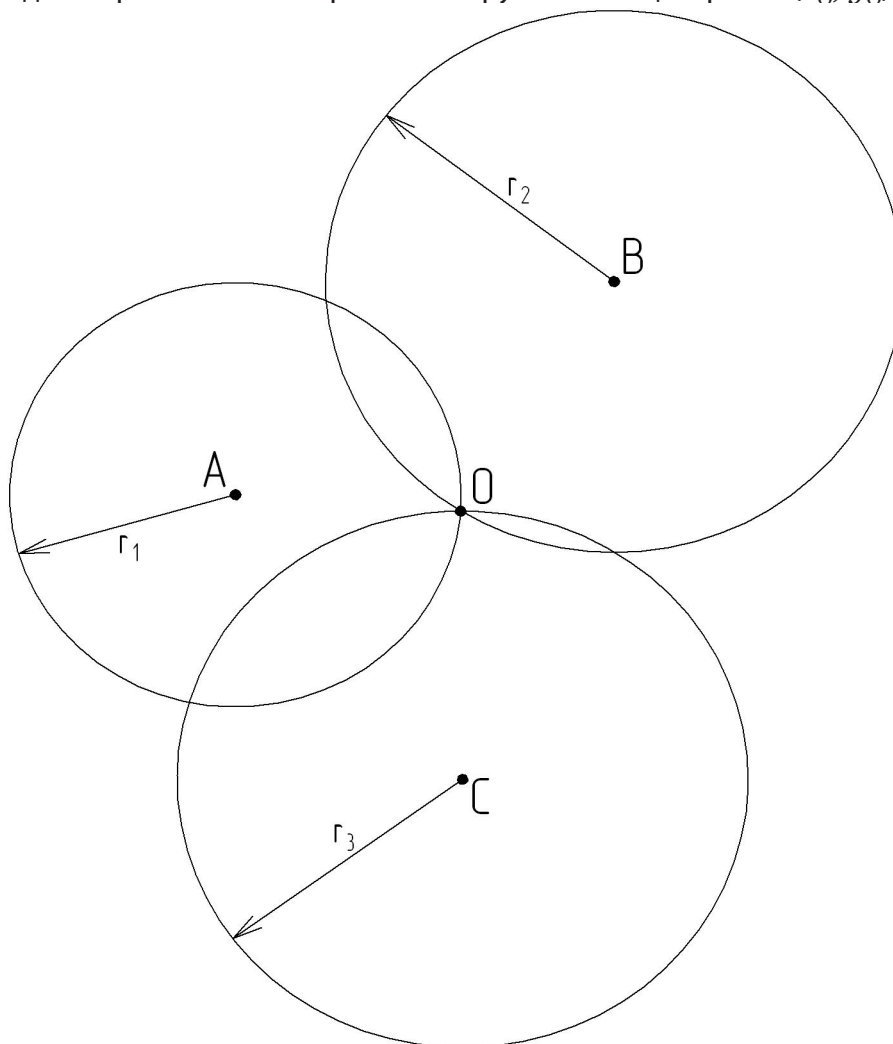


Рис. 3. Определения координат на плоскости

Центр окружности $O(x_O, y_O)$ равен:

$$\begin{vmatrix} x^2 + y^2 & x & y & 1 \\ x_A^2 + y_A^2 & x_A & y_A & 1 \\ x_B^2 + y_B^2 & x_B & y_B & 1 \\ x_C^2 + y_C^2 & x_C & y_C & 1 \end{vmatrix} = 0$$

Если сигналы от трех спутников пришли одновременно, то приёмник находится в

центре окружности.

Предположим, что сигналы от первого, второго и третьего спутника пришли с разными задержками (Рис.4).

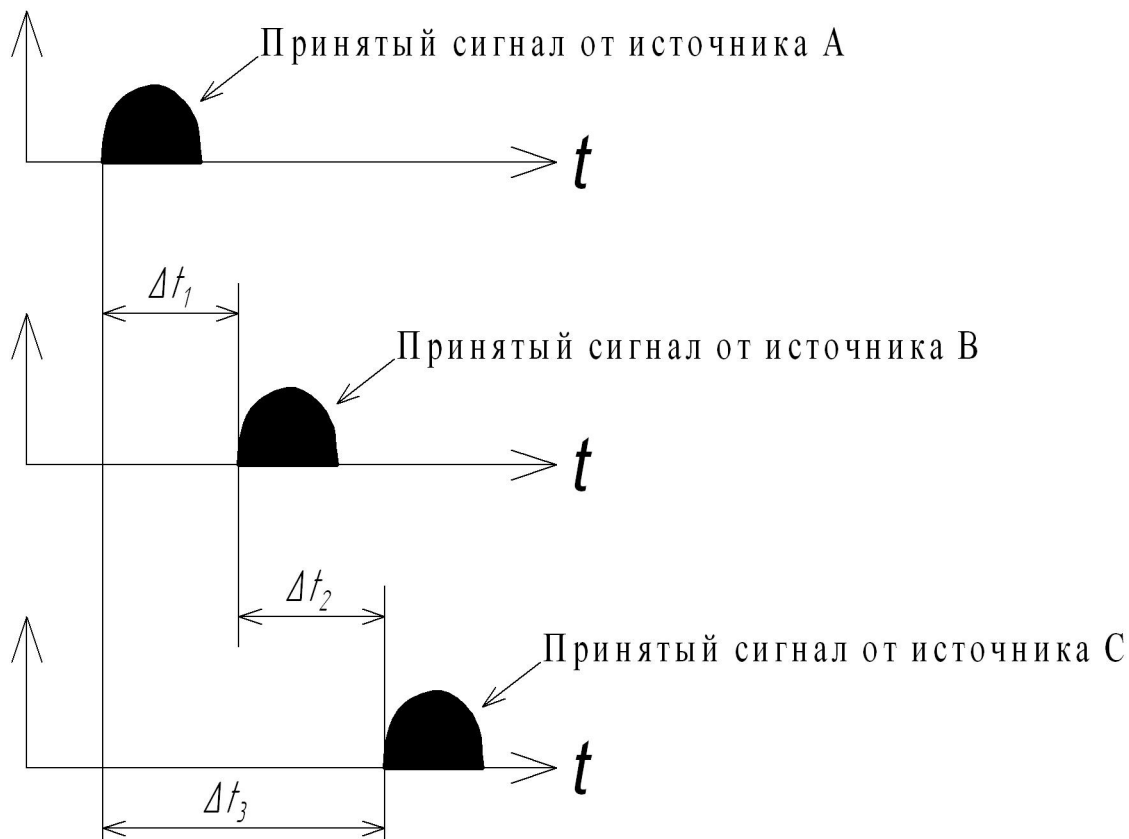


Рис. 4. Измерения задержек прихода сигнала в приёмнике.

$$\Delta t_{AB} = t_A - t_B$$

$$\Delta t_{AC} = t_A - t_C$$

$$\Delta t_{BC} = t_B - t_C$$

Отсюда следует, что сигналы прошли разное расстояние от источников до приёмника. Разность расстояний в прохождении сигнала равна:

$$R_{AB} = \Delta t_{AB} \times V, \text{ м}$$

$$R_{AC} = \Delta t_{AC} \times V, \text{ м}$$

$$R_{BC} = \Delta t_{BC} \times V, \text{ м}$$

где R_{AB} – разность расстояний от источников A и B до приёмника,
 R_{AC} – разность расстояний от источников A и C до приёмника,
 R_{BC} – разность расстояний от источников B и C до приёмника.

Расстояние от источников A , B и C до приёмника O :

$$R_{AB} = R_{AO} - R_{BO}$$

$$R_{AC} = R_{AO} - R_{CO}$$

$$R_{BC} = R_{BO} - R_{CO}$$

Нахождение координат x_O и y_O сводится к решению системы уравнений:

$$R_{AO} = \sqrt{(x_A - x_O)^2 + (y_A - y_O)^2}$$

$$R_{BO} = \sqrt{(x_B - x_O)^2 + (y_B - y_O)^2}$$

$$R_{CO} = \sqrt{(x_C - x_O)^2 + (y_C - y_O)^2}$$

$$R_{AB} = R_{AO} - R_{BO}$$

$$R_{AC} = R_{AO} - R_{CO}$$

$$R_{BC} = R_{BO} - R_{CO}$$

Если представить распределения разности расстояний между источниками, то она будет выражена в виде гиперболы. В случае, когда сигналы пришли одновременно, т.е. $\Delta t = 0$, то вместо гиперболы будет прямая линия, проходящая перпендикулярно через середину прямой, соединяющую источники сигналов.

Теперь рассмотрим случай в пространстве. Для нахождения координат приёмника необходимо минимум четыре источника. Имеется четыре источника с заданными координатами: $A(x_A, y_A, z_A)$, $B(x_B, y_B, z_B)$, $C(x_C, y_C, z_C)$ и $D(x_D, y_D, z_D)$. Сигналы от источников пришли с задержками:

Разность расстояний в прохождении сигнала равна:

$$R_{AB} = \Delta t_{AB} \times V$$

$$R_{AC} = \Delta t_{AC} \times V$$

$$R_{AD} = \Delta t_{AD} \times V$$

$$R_{BC} = \Delta t_{BC} \times V$$

$$R_{BD} = \Delta t_{BD} \times V$$

$$R_{CD} = \Delta t_{CD} \times V$$

Расстояние от источников A , B , C и D до приёмника O равно:

$$R_{AO} = \sqrt{(x_A - x_O)^2 + (y_A - y_O)^2 + (z_A - z_O)^2}$$

$$R_{BO} = \sqrt{(x_B - x_O)^2 + (y_B - y_O)^2 + (z_B - z_O)^2}$$

$$R_{CO} = \sqrt{(x_C - x_O)^2 + (y_C - y_O)^2 + (z_C - z_O)^2}$$

$$R_{DO} = \sqrt{(x_D - x_O)^2 + (y_D - y_O)^2 + (z_D - z_O)^2}$$

Разность расстояний равна:

$$R_{AB} = R_{AO} - R_{BO}$$

$$R_{AC} = R_{AO} - R_{CO}$$

$$R_{AD} = R_{AO} - R_{DO}$$

$$R_{BC} = R_{BO} - R_{CO}$$

$$R_{BD} = R_{BO} - R_{DO}$$

$$R_{CD} = R_{CO} - R_{DO}$$

Нахождение координат x_O , y_O , z_O сводится к решению системы уравнений:

$$R_{AO} = \sqrt{(x_A - x_O)^2 + (y_A - y_O)^2 + (z_A - z_O)^2}$$

$$R_{BO} = \sqrt{(x_B - x_O)^2 + (y_B - y_O)^2 + (z_B - z_O)^2}$$

$$R_{CO} = \sqrt{(x_C - x_O)^2 + (y_C - y_O)^2 + (z_C - z_O)^2}$$

$$R_{DO} = \sqrt{(x_D - x_O)^2 + (y_D - y_O)^2 + (z_D - z_O)^2}$$

$$R_{AB} = R_{AO} - R_{BO}$$

$$R_{AC} = R_{AO} - R_{CO}$$

$$R_{AD} = R_{AO} - R_{DO}$$

$$R_{BC} = R_{BO} - R_{CO}$$

$$R_{BD} = R_{BO} - R_{DO}$$

$$R_{CD} = R_{CO} - R_{DO}$$

В пространстве распределение разности расстояний между источниками будет представлять гиперболоид. Между каждым источником A и B , B и C , C и D , A и D можно выразить функцию распределения разности расстояний (т.е. гиперболоид). При пересечении двух гиперболоидов источников AB и BC дает кривую линию пересечения. Кривую пересечения также дает пересечения гиперболоидов AB и AC . Полученные кривые будут пересекаться в точке O .

Заключение.

Как видно из полученной системы уравнений больше нет привязки к измерению расстояний от источников до приёмника. Точность определения координат зависит только от аппаратных возможностей приёмника (точность и частота часов). Также больше нет необходимости жесткой синхронизации часов спутника и приёмника.

Библиография :

1. Tyler Nighswander, Robert Brumley, Brent Ledvina, David Brumley, Jonathan Diamond. GPS software attacks. 2012г.
2. D. Khrustalev GPS-vzglyad iznutri. Komponenty i tekhnologii. №6 2001.
3. Peter H. Dana. Global Position System (GPS) Time Dissemination for Real-Time Application. 1997.
4. Raj Jain. Potential Networking Application of Global Position Systems (GPS). Gopal Dommety,
5. Navstar GPS uses equipment introduction. Public release version. 1996.
6. Markov S. Printsipy raboty sistemy GPS i ee ispol'zovanie. Access: <http://rix.com.ua/tech/441/404/488/855.html> (date of reference: 01.05.2014).
7. Antonovich K.M. Ispol'zovanie sputnikovykh navigatsionnykh sistem v geodezii. FGUP «Kartgeotsentr», 2006

References:

1. Tyler Nighswander, Robert Brumley, Brent Ledvina, David Brumley, Jonathan Diamond. GPS software attacks. 2012g.
2. D. Khrustalev GPS-vzglyad iznutri. Komponenty i tekhnologii. №6 2001.
3. Peter H. Dana. Global Position System (GPS) Time Dissemination for Real-Time Application. 1997
4. Raj Jain. Potential Networking Application of Global Position Systems (GPS). Gopal Dommety,
5. Navstar GPS uses equipment introduction. Public release version. 1996.
6. Markov S. Printsipy raboty sistemy GPS i ee ispol'zovanie. Access: <http://rix.com.ua/tech/441/404/488/855.html> (date of reference: 01.05.2014).
7. Antonovich K.M. Ispol'zovanie sputnikovykh navigatsionnykh sistem v geodezii. FGUP «Kartgeotsentr», 2006