

УДК 629.783:527

Исследование алгоритмов ориентации высокодинамичных объектов с использованием имитаторов СРНС

В.Е. Вовасов, Герко С.А.

Аннотация

В статье рассматриваются функциональные возможности имитатора сигналов СРНС ИМ-2, подтверждающие возможность использования имитатора для решения задач по оценке углов пространственной ориентации системы объектов. Выведены выражения для псевдодальности и второй разности псевдодальностей из предположения о разном времени формирования сценария имитатора и времени прихода сигнала к навигационному приёмнику. Определены поправки к классическим формулам, описывающим вторую разность псевдодальностей. Экспериментально установлено, что математика имитатора ИМ-2 такова, что для решения задач оценки углов ориентации системы объектов необходимо учитывать половинные поправки к классическим формулам.

Ключевые слова

GPS; высокодинамичные объекты; имитатор сигналов; поправки; определение ориентации; псевдодальности.

Исследование алгоритмов оценки углов ориентации высокодинамичного объекта при использовании навигационного поля, создаваемого имитаторами сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС) является достаточно новой задачей и актуальной в силу сложности создания динамических стендов.

Алгоритмы определения углов ориентации некоторого подвижного объекта основаны на обработке первых или вторых разностей псевдодальностей или псевдофаз [1-3]. Совокупность спутников формирует навигационное поле. Псевдоизмерения формируются несколькими навигационными приёмниками, антенны которых жёстко закреплены на объекте. Использование первых разностей требует, как правило, синхронизации работы приёмников. Поэтому измерения вторых разностей псевдодальностей или псевдофаз обычно используют для решения задач ориентации объектов.

При исследовании и разработке алгоритмов определения пространственной ориентации объектов часто прибегают к использованию средств имитации навигационных сигналов. В данной статье решается вопрос о возможности использования имитатора ИМ-2 от МКБ «Компас»[4] для решения упомянутой задачи. К сожалению, в технических характеристиках указанного имитатора[4] характеристики ошибок по фазе несущей не указаны. Поскольку вторые разности псевдодальностей по отношению к первым содержат меньшее число неучтённых параметров[3], то в данной статье ограничимся исследованием измерений вторых разностей псевдодальностей. Известна связь этих измерений с углами ориентации (крен, тангаж и курс)[3]. Использование псевдодальностей для определения углов ориентации в силу невысоких точностей (порядка нескольких метров) требует больших баз, т.е. расстояний между центрами антенн. Такие задачи могут быть актуальны для морских судов и т.д. Причём они могут иметь как самостоятельное значение, если указанных точностей достаточно, так и вспомогательное для выдачи априорной информации при использовании псевдофазовых измерений.

Для определения ориентации некоторой подвижной системы необходимо моделировать движение нескольких объектов этой системы, при условии, что относительные координаты приёмников СРНС известны в каждый момент времени. Имитатор позволяет пользователю сформировать совокупность сценариев. Рассмотрим самый простой режим работы имитатора. Каждый сценарий представляет из себя имитацию движения одного из объектов системы. Для работы достаточно использовать один приёмник СРНС, который последовательно работает по каждому сценарию имитатора. Очевидно, что в нашем случае параллельная работа приёмников заменяется последовательной работой одного приёмника. Для того чтобы была возможность совмещать работу, необходимо, чтобы каждый сценарий содержал одну и ту же установку начального времени, идентичные координаты спутников на равные моменты времени. В этом случае уход спутниковых шкал времени будет одинаковым от сценария к сценарию. Одновременно с этим, уход шкалы приёмника СРНС будет, как правило, нарастать по мере увеличения временного интервала между сценариями, тем

самым, имитируя иной приёмник со своей шкалой времени. В соответствии с принятой методикой проведения испытаний, будем считать один из сценариев движением базового [3] приёмника, а остальные - движением привязываемых. Номера приёмников участвующих в определении углов ориентации системы объектов будем обозначать индексом i , номером базового будем считать $i=1$.

Для исследования ошибок вторых разностей псевдодальностей с помощью имитатора производилось моделирование движения двух объектов, которые вращаются по окружности радиуса $R=10000$ м (10 км) с центром в точке ($55^\circ 48,64076'$ с. ш., $37^\circ 30,22993'$ в. д., высота 195,384 м над уровнем моря). Плоскость вращения параллельна Земной поверхности или перпендикулярна местной вертикали в указанной точке. Положение объектов вращения диаметрально противоположное (систему можно представить в виде двух объектов, закреплённых на стержне, проходящем через центр окружности). Скорость движения объектов по окружности радиуса R постоянна и равна $V=250$ м/с. В эксперименте использовался навигационный приёмник JNS GGD-EuroCard и антенна MarAnt фирмы Javad Navigation Systems.

Очевидно, что база равная 20 км и скорость 250 м/с являются величинами избыточными. Однако, так как целью работы является исследование воздействия динамики объекта на результаты измерений навигационного приёмника, т.е. на вторые разности псевдодальностей, то удобно использовать предложенные параметры движения.

Приёмник СРНС способен формировать измерения фазы модулирующего кода - псевдодальности. В общем случае математическая модель псевдодальности в i -м приёмнике для j -го спутника представляется следующим образом [1]

$$\rho_i^j(t_k^i) = R_i^j(t_k^i) + C(\Delta T_i(t_k^i) - \Delta T^j(t_{k, \text{prec}}^{i,j}) + T_{\text{atm}}^{i,j} - T_h^{i,j} - T_{\text{mp}}^{i,j} - \mu^{i,j}), \quad (1)$$

где

t_k^i - k -й момент измерения в i -м приёмнике,

$t_{k, \text{prec}}^{i,j}$ - момент предшествования моменту t_k^i для j -го спутника,

$R_i^j(t_k^i)$ - расстояние от спутника до приёмника на момент t_k^i ,

C - скорость распространения сигнала в вакууме,

$\Delta T_i(t_k^i)$ - уход шкалы приёмника СРНС на момент измерения,

$\Delta T^j(t_{k, \text{prec}}^{i,j})$ - уход спутниковых шкал времени на момент $t_{k, \text{prec}}^{i,j}$,

$T_{\text{atm}}^{i,j}$ - дополнительная задержка кодового сигнала в атмосфере,

$T_h^{i,j}$ - аппаратурные, и $T_{\text{мп}}^{i,j}$ - многолучевые искажения,

$\mu^{i,j}$ - ошибка слежения, вызванная внутренними шумами приёмника.

Так как в нашу задачу не входит исследование ошибок многолучёвости и тропосферных и ионосферных искажений, то при написании сценариев эти факторы не учитывались, а при проведении экспериментов с навигационным приёмником не учитывались поправки на тропосферные и ионосферные искажения.

В соответствии с выше принятыми допущениями, перепишем математическую модель псевдодальности (1) в упрощённом виде

$$\rho_i^j(t_k^i) = R_i^j(t_k^i) + C(\Delta T_i(t_k^i) - \Delta T^j(t_{k, \text{prec}}^{i,j}) - T_h^{i,j} - \mu^{i,j}), \quad i = \overline{1, 2} \quad (2)$$

Считается, что моменты времени измерений для всех привязываемых приёмников t_k^i отличаются от момента времени базового t_k^1 на величину ухода шкалы времени приёмников друг от друга и обычно не превышает 10^{-3} с [3]. В нашем случае интервал времени между двумя сценариями не превышал 15-20 минут. Уход шкалы приёмника за это время весьма мал и им можно пренебречь, а k -й момент времени измерения обозначить как t_k .

Выдвинем предположение, что момент времени t_k соответствует времени сценария, т.е. для получения дальности от спутника до приёмника можно брать координаты приёмника непосредственно из сценария. Вычитая измерения базового приёмника из измерений привязываемого, образуем первые разности псевдодальностей. Вторые разности образуются путём вычитания первых разностей, соответствующих опорному спутнику, из первых разностей всех остальных спутников. В статье ограничимся рассмотрением использования сигналов системы GPS, поскольку для этой системы все неучтённые параметры устраняются во вторых разностях псевдодальностей. Для обозначения опорного спутника [3] далее будем использовать индекс $j=1$.

$$\begin{aligned} & [\rho_i^j(t_k) - \rho_i^1(t_k)] - [\rho_i^1(t_k) - \rho_i^1(t_k)] - [R_i^j(t_k) - R_i^1(t_k)] - [R_i^1(t_k) - R_i^1(t_k)] = C \cdot \nabla \Delta \mu^{j,1}, \\ & \nabla \Delta \mu^{j,1} = [\mu^{i,j} - \mu^{1,j}] - [\mu^{i,1} - \mu^{1,1}], \quad j = \overline{2, N} \end{aligned} \quad (3)$$

где N – общее число спутников.

При имитации на входе приёмника формировалось достаточно высокое соотношение сигнал/шум. По этой причине величина $C \cdot \nabla \Delta \mu^{j,i}$ ограничена десятком сантиметров, однако в реальной действительности эта величина имеет порядок нескольких метров. Если данные о координатах приёмников брать непосредственно из сценариев, координаты спутников вычислить по эфемеридным данным, получаемых приёмником, а измерения псевдодальностей производить приёмником при работе имитатора по двум сценариям, то ошибка второй разности псевдодальности, соответствующая выражению (3), исчисляется десятками километров. Из этого следует, что математическая модель задержек кодового сигнала, формируемого имитатором сигнала ИМ-2, не соответствует математической модели измеряемой псевдодальности в приёмнике (2). Попытаемся в процессе написания статьи разобраться с этим вопросом.

Экспериментально установлено следующее выражение для псевдодальности, получаемой от имитатора

$$\rho_i^j(t_k) = K_i - R_i^j(t_k) + C \left(\Delta T_i(t_k) - \Delta T^j(t_{k, \text{prec}}^{i,j}) - T_h^{i,j} - \mu^{i,j} \right), \quad (4)$$

где K_i является некоторой неизвестной величиной. При этом вторые разности псевдодальностей должны соответствовать выражению

$$\begin{aligned} & \left[\rho_i^j(t_k) - \rho_i^j(t_k) \right] - \left[\rho_i^1(t_k) - \rho_i^1(t_k) \right] + \left[R_i^j(t_k) - R_i^j(t_k) \right] - \left[R_i^j(t_k) - R_i^j(t_k) \right] = C \cdot \nabla \Delta \mu^{j,i} \\ & \nabla \Delta \mu^{j,i} = \left[\mu^{i,j} - \mu^{1,j} \right] + \left[\mu^{i,1} - \mu^{1,1} \right], j = \overline{2, N} \end{aligned} \quad (5)$$

На рис.1 представлено значение выражения (5) для каждого момента времени сценария.

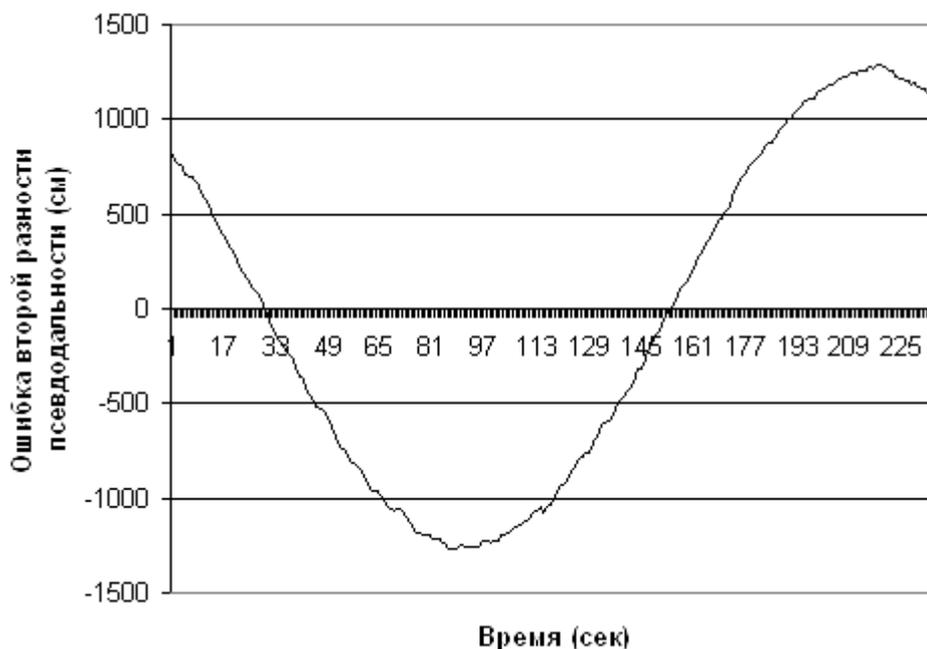


Рис.1 – Ошибка второй разности псевдодальности

Из рис.1 видно, что несмотря на то, что значение выражения (5) близко к истинному, однако имеет некоторую регулярную составляющую, связанную, по всей видимости, с тем, что дальности $R_i^j(t_k)$ в (5) не истинно отражают дальности соответствующие дальностям, прописанным в сценарии имитатора ИМ-2.

Сделаем предположение, что момент измерения t_k и момент формирования сценария $t_{сц}$ связаны выражением $t_k = t_{сц} - \frac{R_i^j}{C}$. Тогда для имитации математическая модель задержек кодового сигнала в зависимости от расстояния между спутником в момент предшествования и приёмником в имитаторе псевдодальность должна представляться в следующем виде

$$\rho_i^j(t_k) = K_i - R_i^j \left(t_{сц} - \frac{R_i^j}{C} \right) + C \left(\Delta T_i(t_k) - \Delta T^j(t_{k,prec}^{i,j}) - T_h^{i,j} - \mu^{i,j} \right) \quad (6)$$

Вторые разности псевдодальностей с учётом (6) представимы в виде

$$\begin{aligned}
& [\rho_i^j(t_k) - \rho_i^j(t_k)] - [\rho_i^i(t_k) - \rho_i^i(t_k)] = \\
& = \left[R_i^j \left(t_{\text{ци}} - \frac{R_i^j}{C} \right) - R_i^j \left(t_{\text{ци}} - \frac{R_i^j}{C} \right) \right] - \left[R_i^j \left(t_{\text{ци}} - \frac{R_i^j}{C} \right) - R_i^j \left(t_{\text{ци}} - \frac{R_i^j}{C} \right) \right] + C \cdot \nabla \Delta \mu^{j,i}
\end{aligned} \tag{7}$$

Определим дальность от j-ого спутника до i-ого приёмника для момента времени

$$\begin{aligned}
& t_{\text{ци}} - \frac{R_i^j}{C} \\
& R_i^j \left(t_{\text{ци}} - \frac{R_i^j}{C} \right) = \left(\left[x_j^{\text{сп}}(t_{k, \text{prec}}^j) - x_i^{\text{пр}} \left(t_{\text{ци}} - \frac{R_i^j}{C} \right) \right]^2 + \right. \\
& \left. + \left[y_j^{\text{сп}}(t_{k, \text{prec}}^j) - y_i^{\text{пр}} \left(t_{\text{ци}} - \frac{R_i^j}{C} \right) \right]^2 + \left[z_j^{\text{сп}}(t_{k, \text{prec}}^j) - z_i^{\text{пр}} \left(t_{\text{ци}} - \frac{R_i^j}{C} \right) \right]^2 \right)^{0,5} = \\
& = \sqrt{\left[\bar{x}_j^{\text{сп}}(t_{k, \text{prec}}^j) - \bar{x}_i^{\text{пр}} \left(t_{\text{ци}} - \frac{R_i^j}{C} \right) \right]^T \cdot \left[\bar{x}_j^{\text{сп}}(t_{k, \text{prec}}^j) - \bar{x}_i^{\text{пр}} \left(t_{\text{ци}} - \frac{R_i^j}{C} \right) \right]}
\end{aligned} \tag{8}$$

где

$$\bar{x}_j^{\text{сп}} = \begin{pmatrix} x_j^{\text{сп}}(t_{k, \text{prec}}^j) \\ y_j^{\text{сп}}(t_{k, \text{prec}}^j) \\ z_j^{\text{сп}}(t_{k, \text{prec}}^j) \end{pmatrix} \tag{9}$$

- координаты j-ого спутника, а

$$\bar{x}_i^{\text{пр}} = \begin{pmatrix} x_i^{\text{пр}}(t_{\text{ци}}) \\ y_i^{\text{пр}}(t_{\text{ци}}) \\ z_i^{\text{пр}}(t_{\text{ци}}) \end{pmatrix} \tag{10}$$

- координаты i-ого приёмника. Величина $R_i^j(t_{\text{ци}})$ является известной из сценария величиной, так же как и координаты спутников и приёмников.

Координаты i-ого приёмника в момент времени $t_{\text{ци}} - \frac{R_i^j}{C}$ можно получить из

координат в момент времени t_{cu} разложив в ряд Тейлора величину

$$\bar{\mathbf{x}}_i^{mp} \left(t_{cu} - \frac{R_i^j}{C} \right) = \bar{\mathbf{x}}_i^{mp} (t_{cu}) - \dot{\bar{\mathbf{x}}}_i^{mp} (t_{cu}) \frac{R_i^j}{C}.$$

При разложении достаточно ограничиться только первым членом разложения

$$\begin{aligned} R_i^j \left(t_{cu} - \frac{R_i^j}{C} \right) &= \\ &= \sqrt{\left[\bar{\mathbf{x}}_j^{cn} (t_{k, prec}^j) - \bar{\mathbf{x}}_i^{mp} (t_{cu}) + \dot{\bar{\mathbf{x}}}_i^{mp} (t_{cu}) \frac{R_i^j}{C} \right]^T \cdot \left[\bar{\mathbf{x}}_j^{cn} (t_{k, prec}^j) - \bar{\mathbf{x}}_i^{mp} (t_{cu}) + \dot{\bar{\mathbf{x}}}_i^{mp} (t_{cu}) \frac{R_i^j}{C} \right]} = \\ &= \sqrt{\left[\bar{\mathbf{D}}_{i,j} + \bar{\Delta}_{i,j} \right]^T \cdot \left[\bar{\mathbf{D}}_{i,j} + \bar{\Delta}_{i,j} \right]} \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\bar{\mathbf{D}}_{i,j} = \left[\bar{\mathbf{x}}_j^{cn} (t_{k, prec}^j) - \bar{\mathbf{x}}_i^{mp} (t_{cu}) \right], \quad (12)$$

$$\bar{\Delta}_{i,j} = \dot{\bar{\mathbf{x}}}_i^{mp} (t_{cu}) \frac{R_i^j}{C} \quad (13)$$

Тогда

$$\begin{aligned} R_i^j \left(t_{cu} - \frac{R_i^j}{C} \right) &= \sqrt{\left[\bar{\mathbf{D}}_{i,j} \right]^T \cdot \left[\bar{\mathbf{D}}_{i,j} \right] + 2 \cdot \left[\bar{\mathbf{D}}_{i,j} \right]^T \cdot \bar{\Delta}_{i,j} + \left[\bar{\Delta}_{i,j} \right]^T \cdot \left[\bar{\Delta}_{i,j} \right]} = \\ &= R_i^j (t_{cu}) \sqrt{1 + \frac{2 \cdot \left[\bar{\mathbf{e}}_{i,j} \right]^T \cdot \bar{\Delta}_{i,j} + \left[\bar{\Delta}_{i,j} \right]^T \cdot \left[\bar{\Delta}_{i,j} \right]}{\left(R_i^j (t_{cu}) \right)^2}} = R_i^j (t_{cu}) \sqrt{1 + E_{i,j}} \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$\bar{\mathbf{e}}_{i,j} = \frac{\bar{\mathbf{D}}_{i,j}}{R_i^j (t_{cu})} \quad (15)$$

$$R_i^j (t_{cu}) = \sqrt{\left[\bar{\mathbf{D}}_{i,j} \right]^T \cdot \left[\bar{\mathbf{D}}_{i,j} \right]} \quad (16)$$

$$E_{i,j} = \frac{2 \cdot [\bar{\mathbf{e}}_{i,j}]^T \cdot \bar{\Delta}_{i,j}}{R_i^j(t_{cu})} + \frac{[\bar{\Delta}_{i,j}]^T \cdot [\bar{\Delta}_{i,j}]}{(R_i^j(t_{cu}))^2} \quad (17)$$

В рассматриваемых случаях модуль величины $\bar{\Delta}_{i,j} = \dot{\bar{\mathbf{x}}}_i^{np}(t_{cu}) \frac{R_i^j}{C}$ составляет порядка 10 метров. Отсюда первое слагаемое величины $E_{i,j}$ в (17) не превышает величину 10^{-6} , второе слагаемое не превышает величину $0,25 \cdot 10^{-12}$ и им можно пренебречь. Разложим в ряд по степеням величину $\sqrt{(1 + E_{i,j})}$, и из-за малости прочих членов разложения ограничимся первым членом

$$R_i^j\left(t_{cu} - \frac{R_i^j}{C}\right) = R_i^j(t_{cu}) \cdot \left(1 + \frac{1}{2} E_{i,j} - \frac{1}{8} E_{i,j}^2 + \frac{1}{16} E_{i,j}^3 - \dots\right) \quad (18)$$

Окончательно запишем

$$R_i^j\left(t_{cu} - \frac{R_i^j}{C}\right) = R_i^j(t_{cu}) \cdot \left(1 + \frac{1}{2} E_{i,j}\right) = R_i^j(t_{cu}) + [\bar{\mathbf{e}}_{i,j}]^T \cdot \bar{\Delta}_{i,j} \quad (19)$$

Для второй разности псевдодальностей в соответствии с нашим предположением можно записать следующее уравнение

$$\begin{aligned} & [\rho_i^j(t_k) - \rho_i^j(t_k)] - [\rho_i^1(t_k) - \rho_i^1(t_k)] + [R_i^j(t_{cu}) - R_i^j(t_{cu})] - [R_i^1(t_{cu}) - R_i^1(t_{cu})] + \\ & + \left[[\bar{\mathbf{e}}_{i,j}]^T \cdot \bar{\Delta}_{i,j} - [\bar{\mathbf{e}}_{i,j}]^T \cdot \bar{\Delta}_{i,j} \right] - \left[[\bar{\mathbf{e}}_{i,l}]^T \cdot \bar{\Delta}_{i,l} - [\bar{\mathbf{e}}_{i,l}]^T \cdot \bar{\Delta}_{i,l} \right] = C \cdot \nabla \Delta \mu^{j,i} \end{aligned} \quad (20)$$

Подставляя в (20) значение $\bar{\Delta}_{i,j}$ из (13) получим

$$\begin{aligned} & [\rho_i^j(t_k) - \rho_i^j(t_k)] - [\rho_i^1(t_k) - \rho_i^1(t_k)] + [R_i^j(t_{cu}) - R_i^j(t_{cu})] - [R_i^1(t_{cu}) - R_i^1(t_{cu})] + \\ & + \left[[\bar{\mathbf{e}}_{i,j}]^T \cdot \dot{\bar{\mathbf{x}}}_i^{np}(t_{cu}) \frac{R_i^j}{C} - [\bar{\mathbf{e}}_{i,j}]^T \cdot \dot{\bar{\mathbf{x}}}_i^{np}(t_{cu}) \frac{R_i^j}{C} \right] - \\ & - \left[[\bar{\mathbf{e}}_{i,l}]^T \cdot \dot{\bar{\mathbf{x}}}_i^{np}(t_{cu}) \frac{R_i^1}{C} - [\bar{\mathbf{e}}_{i,l}]^T \cdot \dot{\bar{\mathbf{x}}}_i^{np}(t_{cu}) \frac{R_i^1}{C} \right] = C \cdot \nabla \Delta \mu^{j,i} \end{aligned} \quad (21)$$

На рис.2 представлено значение выражения (21) для каждого момента времени сценария.

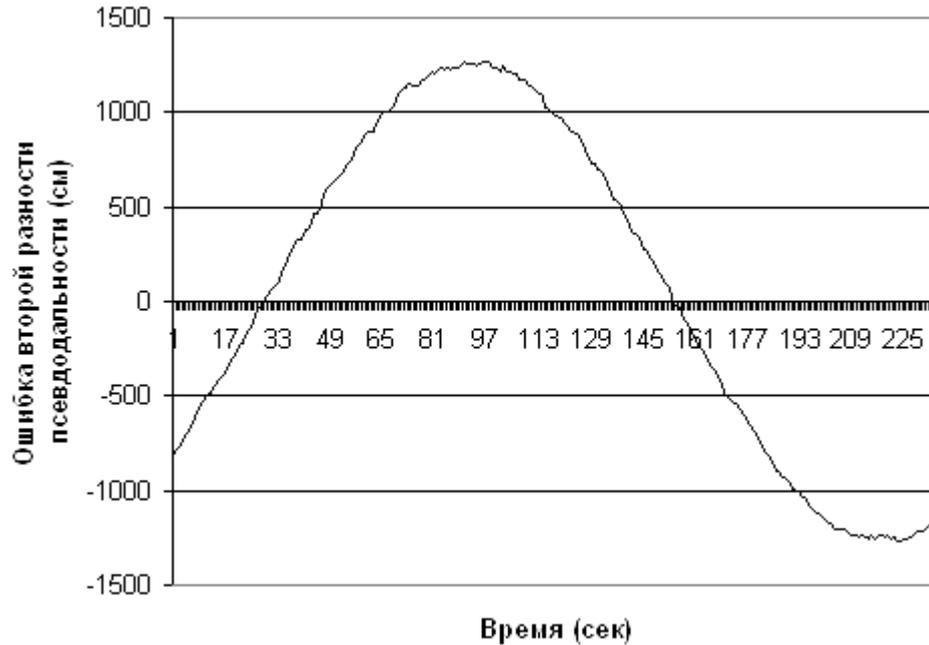


Рис.2 – Ошибка второй разности псевдодальности

Из приведённого рисунка видно, что значение формулы (21), так же как и (5) близко к истинному, но имеет некоторую регулярную составляющую. Заметим, что рис.1 и рис.2 симметричны относительно оси абсцисс. Из этого следует вывод, что математическую модель измеряемой псевдодальности следует представлять в виде

$$\begin{aligned}
 \rho_i^j(t_k) &= K_i - R_i^j \left(t_{cu} - \frac{1}{2} \frac{R_i^j}{C} \right) + C \left(\Delta T_i(t_k) - \Delta T^j(t_{k,prec}^{i,j}) - T_h^{i,j} - \mu^{i,j} \right) = \\
 &= K_i - R_i^j(t_{cu}) - \frac{1}{2} [\bar{\mathbf{e}}_{i,j}]^T \cdot \dot{\bar{\mathbf{x}}}_i^{np}(t_{cu}) \frac{R_i^j}{C} + C \left(\Delta T_i(t_k) - \Delta T^j(t_{k,prec}^{i,j}) - T_h^{i,j} - \mu^{i,j} \right)
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

В этом случае вторая разность псевдодальностей будет определяться выражением

$$\begin{aligned}
& [\rho_i^j(t_k) - \rho_i^j(t_k)] - [\rho_i^1(t_k) - \rho_i^1(t_k)] + [R_i^j(t_{cu}) - R_i^j(t_{cu})] - [R_i^1(t_{cu}) - R_i^1(t_{cu})] + \\
& + 0,5 \cdot \left[[\bar{\mathbf{e}}_{i,j}]^T \cdot \dot{\mathbf{x}}_i^{mp}(t_{cu}) \frac{R_i^j}{C} - [\bar{\mathbf{e}}_{i,j}]^T \cdot \dot{\mathbf{x}}_i^{mp}(t_{cu}) \frac{R_i^j}{C} \right] - \\
& - 0,5 \cdot \left[[\bar{\mathbf{e}}_{i,l}]^T \cdot \dot{\mathbf{x}}_i^{mp}(t_{cu}) \frac{R_i^1}{C} - [\bar{\mathbf{e}}_{i,l}]^T \cdot \dot{\mathbf{x}}_i^{mp}(t_{cu}) \frac{R_i^1}{C} \right] = C \cdot \nabla \Delta \mu^{j,i}
\end{aligned} \tag{23}$$

Величины

$$0,5 \cdot \left\{ \left[[\bar{\mathbf{e}}_{i,j}]^T \cdot \dot{\mathbf{x}}_i^{mp}(t_{cu}) \frac{R_i^j}{C} - [\bar{\mathbf{e}}_{i,j}]^T \cdot \dot{\mathbf{x}}_i^{mp}(t_{cu}) \frac{R_i^j}{C} \right] - \left[[\bar{\mathbf{e}}_{i,l}]^T \cdot \dot{\mathbf{x}}_i^{mp}(t_{cu}) \frac{R_i^1}{C} - [\bar{\mathbf{e}}_{i,l}]^T \cdot \dot{\mathbf{x}}_i^{mp}(t_{cu}) \frac{R_i^1}{C} \right] \right\} \tag{24}$$

будем в дальнейшем называть поправками к классической формуле. На рис.3 представлено значение выражения (23) в каждый момент времени сценария.

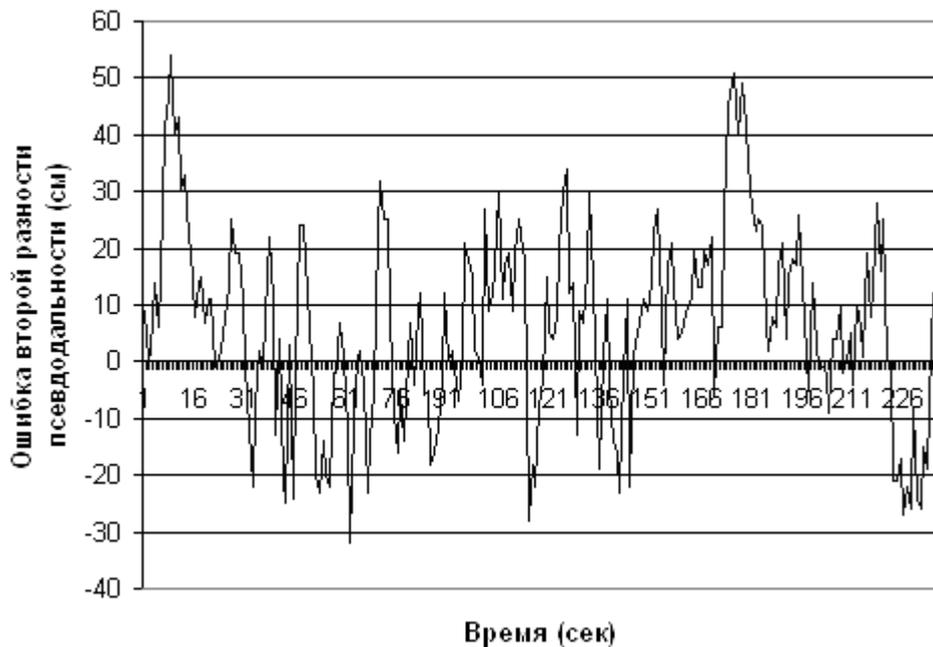


Рис.3 – Ошибка второй разности псевдодальности

Из рис.3 видно, что ошибка второй разности псевдодальности выражения (23) не превышает 0,5 м. Это указывает на то, что для невысоких точностей измерений, которыми являются псевдодальности, представлением математической модели (22) можно пользоваться при работе с имитатором ИМ-2.

Осталось определить, как приведенные поправки соответствуют реальной действительности. Для этого достаточно считать, что координаты объектов в сценарии

связаны с системным временем GPS - $t_{\text{сшв}}$. Тогда время прихода сигнала в i -й приёмник от j -ого спутника равно $t_k = t_{\text{сшв}} + \frac{R_i^j}{C} - T_h^{i,j}$. С учётом выполнения неравенства $\frac{R_i^j}{C} \ll |T_h^{i,j}|$ можно записать

$$t_k = t_{\text{сшв}} + \frac{R_i^j}{C} \quad (25)$$

Тогда дальность в этой точке при использовании выражения (25) может быть представлена в виде

$$R_i^j \left(t_{\text{сшв}} + \frac{R_i^j}{C} \right) = R_i^j(t_{\text{сшв}}) - [\bar{\mathbf{e}}_{i,j}]^T \cdot \bar{\Delta}_{i,j} = R_i^j(t_{\text{сшв}}) - [\bar{\mathbf{e}}_{i,j}]^T \cdot \dot{\mathbf{x}}_i^{\text{мп}}(t_{\text{сш}}) \frac{R_i^j}{C} \quad (26)$$

Вывод выражения (26) аналогичен выводу (19). Отсюда следует, что выражения для псевдодальности и второй разности псевдодальностей соответственно равны

$$\rho_i^j(t_k) = R_i^j(t_{\text{сшв}}) - [\bar{\mathbf{e}}_{i,j}]^T \cdot \dot{\mathbf{x}}_i^{\text{мп}}(t_{\text{сш}}) \frac{R_i^j}{C} + C(\Delta T_i(t_k) - \Delta T^j(t_{k,\text{prec}}^{i,j}) - T_h^{i,j} - \mu^{i,j}) \quad (27)$$

$$\begin{aligned} & [\rho_i^j(t_k) - \rho_i^j(t_k)] - [\rho_i^1(t_k) - \rho_i^1(t_k)] - [R_i^j(t_{\text{сш}}) - R_i^j(t_{\text{сш}})] + [R_i^1(t_{\text{сш}}) - R_i^1(t_{\text{сш}})] + \\ & + \left[[\bar{\mathbf{e}}_{i,j}]^T \cdot \dot{\mathbf{x}}_i^{\text{мп}}(t_{\text{сш}}) \frac{R_i^j}{C} - [\bar{\mathbf{e}}_{i,j}]^T \cdot \dot{\mathbf{x}}_i^{\text{мп}}(t_{\text{сш}}) \frac{R_i^j}{C} \right] - \\ & - \left[[\bar{\mathbf{e}}_{i,l}]^T \cdot \dot{\mathbf{x}}_i^{\text{мп}}(t_{\text{сш}}) \frac{R_i^l}{C} - [\bar{\mathbf{e}}_{i,l}]^T \cdot \dot{\mathbf{x}}_i^{\text{мп}}(t_{\text{сш}}) \frac{R_i^l}{C} \right] = C \cdot \nabla \Delta \mu^{j,i} \end{aligned} \quad (28)$$

Поправки к выражению второй разности псевдодальности при измерениях по реальным спутникам (28) и имитатору ИМ-2 (23) по знаку совпадают, а по величине различаются в два раза. Таким образом, зная указанные особенности имитатора, с его помощью мы можем производить исследования алгоритмов определения ориентации по измерениям псевдодальностей.

Величина поправок зависит от скорости движения антенн приёмников. Поэтому для не высокочастотных объектов при базах, порядка ста метров, скорость антенны приёмника, как правило, на два порядка меньше, чем принято в эксперименте. Это означает,

что и величина поправок меньше на два порядка и соответствует нескольким дециметрам. Этот результат на порядок меньше, чем среднеквадратические ошибки измерений псевдодальности. Такими ошибками, как правило, пренебрегают.

Использование математической модели задержек кодового сигнала формируемого имитатором ИМ-2 не является всеохватывающим. В ряде случаев функциональные возможности имитатора, связанные с формированием приёмником псевдофазовых измерений, могут быть востребованы. Исследования, проведённые в данной статье, являются основой для поиска математической модели задержек фазы несущего сигнала, формируемого в имитаторе ИМ-2. Среднеквадратическая ошибка измерения псевдофазы соответствует нескольким миллиметрам, а физическая природа поправок для измерений псевдодальностей и псевдофаз одинакова. Это указывает на то, что при использовании имитатора ИМ-2 и псевдофазовых измерений для задач ориентации не учёт поправок приводит к значительным ошибкам смещения оценки углов ориентации уже при скоростях приёмников порядка нескольких метров в секунду. Таким образом, введение поправок в измерения псевдофаз навигационных приёмников при решении задач пространственной ориентации высокодинамичных объектов необходимо.

Библиографический список

- 1 Фатеев Ю.Л. (Красноярский государственный технический университет) Динамические методы измерения угловой ориентации объектов по псевдофазовым измерениям. // Электронный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ» 2004, С.770-780.
- 2 A. Kleusberg. Mathematics of Attitude Determination with GPS. // GPS WORLD, September, 1995, p. 72.
- 3 Поваляев А.А. Спутниковые радионавигационные системы – М.: Радиотехника, 2008. - 328с.
- 4 ОАО "МКБ "Компас". ИМИТАТОР СИГНАЛОВ СРНС ИМ-2. Основные особенности. Технические параметры, <http://mkb-kompas.ru/index.php?page=imitator-signalov-srns-im-2>, дата обращения 22.09.2011.

Сведения об авторах

Вовасов Валерий Егорович, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н., тел.: (962) 968-55-31; e-mail: vovasov@list.ru

Герко Сергей Александрович, аспирант Московского авиационного института
(национального исследовательского университета), тел.: (916) 958-47-00; e-mail:
S.Gerko@mail.ru