

Применение датчиков счисления пути для навигационного обеспечения наземного транспорта, использующего приемники спутниковых РНС

Геннадий Худяков,
д. т. н., профессор,

Анна Белова

В течение последних десяти лет использование аппаратуры современных спутниковых радионавигационных систем гражданскими пользователями в России и за рубежом приобретает массовый характер, особенно в городских условиях — в рамках развития новой области технического обеспечения логистических технологий: интеллектуальных транспортных систем [1, 2]. Однако дальнейшему прогрессу в этом направлении препятствуют отсутствие хорошей цифровой картографии, а также эффект «городских ущелий» (urban canyons) [1].

Как известно [1, 2], для местоопределения с помощью среднеорбитальных спутниковых систем радионавигации GPS и ГЛОНАСС (спутниковых РНС — СРНС) необходимо, чтобы в зоне прямой видимости антенны приемоизмерителя (ПИ) СРНС было в наличии не менее четырех спутников радионавигационной системы. Однако не во всех точках земной поверхности удастся выполнить это условие: на городских территориях часто происходит временное пропадание сигналов СРНС вследствие затенения сигналов спутниковых РНС городскими постройками.

Для непрерывного высокоточного местоопределения наземных транспортных средств (НТС) — в течение периода временного отсутствия сигналов необходимого созвездия системы СРНС — можно применять комплексирование бортового приемоизмерителя данной системы с датчиками счисления пути: спидометрами, одометрами, гироскопами, акселерометрами, датчиками угла поворота НТС и т. п. Эти датчики передают информацию о местоположении НТС, не зависящую от наличия или условий приема необходимых сигналов радионавигационной системы, при наличии реперных точек, координаты которых известны с высокой степенью точности (1–2 м).

Оптимальная обработка в бортовом процессоре измерительной информации, полу-

чаемой от датчиков счисления пути, совместно с данными приемоизмерителя спутниковой РНС должна обеспечить непрерывное местоопределение НТС — при временном отсутствии необходимого числа спутников в зоне прямой видимости, а также существенное повышение точности навигационного местоопределения — при наличии необходимого количества сигналов системы СРНС. Эти высокоточные координаты НТС используются как реперные при внезапном кратковременном пропадании необходимого количества сигналов спутниковых РНС.

В статье приведены результаты теоретических исследований метода оптимальной (по критерию минимума дисперсии погрешностей местоопределения НТС) обработки информации, получаемой в бортовом навигационном комплексе. С помощью этого метода можно не только рассчитывать допустимое время потери сигналов необходимого созвездия спутниковых РНС при использовании датчиков счисления пути — при допустимом снижении точности местоопределения НТС, но и достаточно просто оценивать степень увеличения точности местоопределения — в случае совместного использования датчиков счисления пути и необходимой совокупности сигналов СРНС.

Обобщенная структура бортового комплекса

На рис. 1 показана структурная схема бортового комплекса сухопутной навигации (БКШН). На бортовой процессор (микро-ЭВМ) наземного транспортного средства поступают данные о его текущем местоположении от подключенного к процессору цифрового выхода приемника спутниковой РНС. На процессор также поступают цифровые данные о скорости движения НТС (от спидометра, одометра или акселерометра) и о направлении движения (от вибрационного гироскопа, дифференциального одометра или иного измерителя изменения направления движения НТС).

В бортовом процессоре БКСН происходит — по заданному алгоритму — совместная обработка информации о местоположении НТС, получаемой по сигналам спутниковой РНС, и информации о скорости и направлении движения наземного транспортного средства, получаемой от датчиков счисления пути. Полученные результаты поступают на дисплей водителя, на котором выводится местоположение НТС на фоне цифровой карты города или данной местности.

На рис. 2 приведены обобщенные результаты обработки информации в БКСН. В каждый дискретный момент времени t_j (обычно через каждую секунду) определяются координаты НТС — по сигналам СРНС, а также значения текущей скорости V и направления движения α НТС.

На рис. 2 кружочками показаны местоположения НТС (x_p, y_p) , определенные в моменты времени $t = t_j$ по сигналам спутниковой РНС, а звездочками — экстраполяции местоположения НТС $(\tilde{x}_p, \tilde{y}_p)$ по предыдущим оптимальным оценкам его местоположения $(\hat{x}_{j-1}, \hat{y}_{j-1})$ и значениям V_{j-1} и α_{j-1} . Треугольники показывают оптимальные оценки местоположения НТС (\hat{x}_p, \hat{y}_p) в момент времени $t = t_p$, полученные по координатам (x_p, y_p) и $(\tilde{x}_p, \tilde{y}_p)$.

На каждом шаге оценивания координат (\hat{x}_p, \hat{y}_p) следует минимизировать средний квадрат расстояния от истинного положения НТС (x_0, y_0) до оценки (\hat{x}_p, \hat{y}_p) , т. е.

$$\sigma_r^2 = \overline{r^2} = \overline{(\hat{x} - x_0)^2 + (\hat{y} - y_0)^2} = \overline{(\hat{x} - x_0)^2} + \overline{(\hat{y} - y_0)^2} = D(\hat{x}) + D(\hat{y}).$$

Поскольку в выражение для σ_r^2 не входит корреляция оценок

$$R_{xy} = \overline{(\hat{x} - x_0)(\hat{y} - y_0)},$$

то задача сводится к раздельной минимизации величин

$$\sigma_x^2 = D(\hat{x}) \text{ и } \sigma_y^2 = D(\hat{y}).$$

Если считается, что НТС движется только по дорогам, то процессор производит редукцию его текущего местоположения на цифровую автодорожную карту местности: простым методом — по нормали к дороге — или же методом припасовки траектории НТС к отображению дороги на дисплее водителя (map matching method) [1]. Адекватность отображения положения НТС на самой автодороге определяется финальной точностью его местопределения в результате комплексной обработки текущей информации.

При голосовой проводке по сложному городскому маршруту (rout guidance [1]) требования к точности местопределения НТС вдоль дорожной полосы существенно возрастают, поскольку процессор должен своевременно информировать водителя о предстоящем повороте на очередной перекрестке с помощью синтезатора речи.

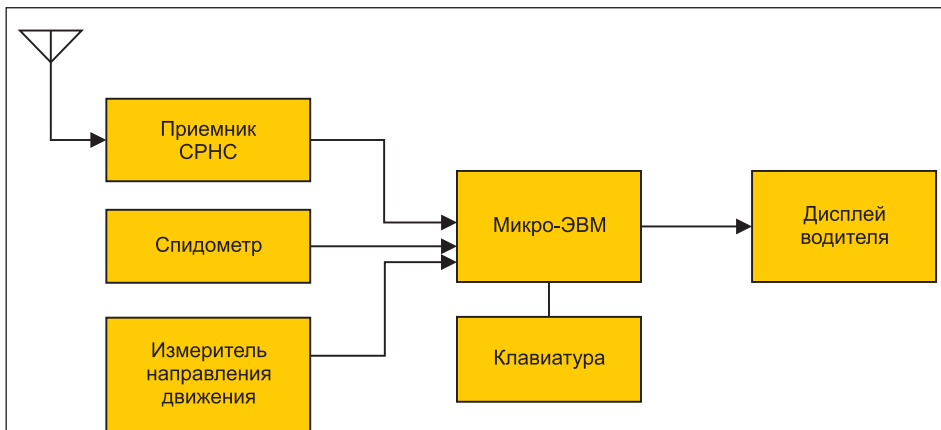


Рис. 1. Структура бортового навигационного комплекса

Поэтому имеет смысл детально рассмотреть «одномерный случай»: движение НТС по отдельной дорожной полосе.

Движение НТС по городской улице

В этом случае нас будет интересовать только продольная по отношению к дороге координата НТС. Поэтому повернем систему координат (x, y) на рис. 2 так, чтобы ось Ox пошла вдоль траектории истинного движения НТС.

Будем полагать следующее:

- погрешности всех измерений — независимые случайные величины, не имеющие регулярных смещений, т. е. их средние значения — нулевые;
- временная дискретность Δt такова, что погрешности всех последующих измерений

не зависят от погрешностей предыдущих измерений;

- все погрешности имеют гауссовские плотности вероятности.

Это дает возможность искать все оптимальные оценки в линейном виде [3].

Рекурсивный алгоритм совместной обработки информации о местоположении НТС по сигналам спутниковой РНС (координат x_j) и по данным о скорости его движения V_j в одномерном случае выглядит следующим образом:

Точка 1: а) измеряются значения x_1 и V_1 ; б) оптимальная линейная оценка местоположения НТС есть $\hat{x}_1 = x_1$; в) дисперсия оценки $D(\hat{x}_1) = \sigma_x^2$.

Точка 2: а) измеряются значения x_2 и V_2 ; б) оценивается значение \tilde{x}_2 по инфор-

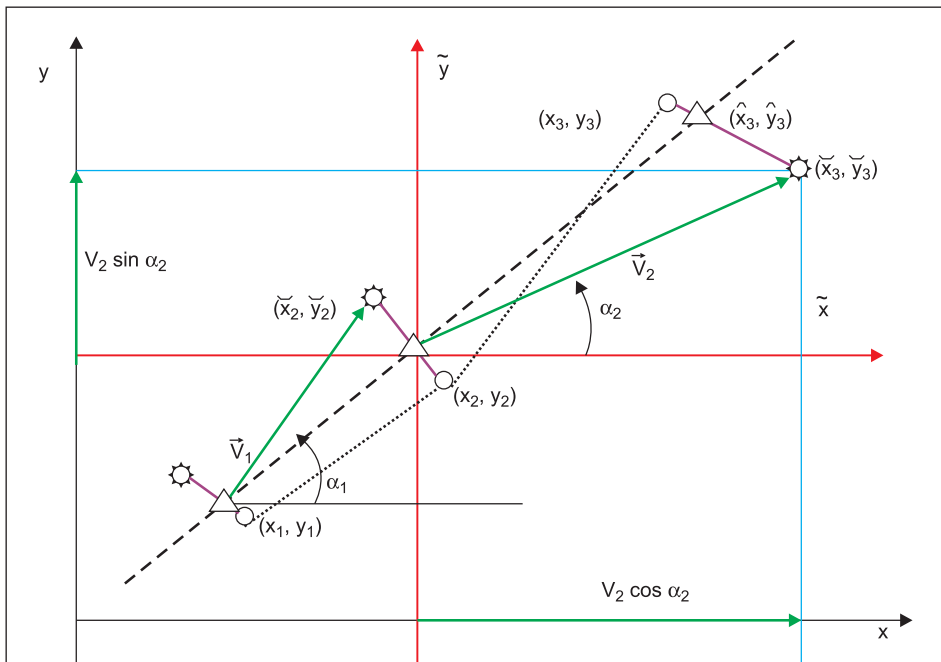


Рис. 2. Двумерный случай навигационного обеспечения НТС: \circ — координаты (x_i, y_i) , определенные по приемнику СРНС; \star — координаты $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$, определенные по предыдущей оценке $(\hat{x}_{i-1}, \hat{y}_{i-1})$ с помощью счисления пути по вектору $\vec{V}: (V, \alpha)$; Δ — координаты (\hat{x}_i, \hat{y}_i) оценены по текущим координатам СРНС (x_i, y_i) и по результатам счисления пути $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$; — — — оптимальная оценка траектории движения НТС

мации, полученной в предыдущей точке: $\tilde{x}_2 = x_1 + V_1 \Delta t$; в) находится линейная оценка в виде $\hat{x}_2 = ax_2 + b\tilde{x}_2$ [3].

Здесь

$$a = \frac{\sigma_x^{-2}}{\sigma_x^{-2} + D^{-1}(\tilde{x}_2)}; \quad b = \frac{D^{-1}(\tilde{x}_2)}{\sigma_x^{-2} + D^{-1}(\tilde{x}_2)}.$$

Погрешность оценки \tilde{x}_2 есть $\Delta\tilde{x}_2 = \Delta x_1 + \Delta V_1 \Delta t$. Значит, величина $D(\tilde{x}_2)$ равна $D(\tilde{x}_2) = (\Delta\tilde{x}_2)^2 = \sigma_x^2 + \sigma_v^2 \Delta t^2$, а дисперсия $D(\hat{x}_2)$ оценки \hat{x}_2 определяется выражением $D^{-1}(\hat{x}_2) = \sigma_x^{-2} + D^{-1}(\tilde{x}_2)$, или

$$D^{-1}(\hat{x}_2) = \frac{1}{\sigma_x^2} + \frac{1}{\sigma_x^2 + \sigma_v^2 \Delta t^2} = \frac{1}{\sigma_x^2} + \frac{1/\sigma_x^2}{1 + \sigma_v^2 \Delta t^2 / \sigma_x^2}. \quad (1)$$

Введем безразмерный параметр задачи: $\xi = \sigma_v \Delta t / \sigma_x$.

Тогда формула (1) запишется в виде

$$\frac{1}{D(\hat{x}_2)} = \frac{1}{\sigma_x^2} \left(1 + \frac{1}{1 + \xi^2} \right),$$

$$\text{или } \frac{D(\hat{x}_2)}{\sigma_x^2} = \frac{1 + \xi^2}{2 + \xi^2}, \text{ или } \lambda_2 = \frac{1 + \xi^2}{2 + \xi^2},$$

где λ_2 — второй безразмерный параметр задачи: $\lambda_2 = D(\hat{x}_2) / \sigma_x^2$.

Если $\sigma_v = 0$, то $\xi = 0$, а $D(\hat{x}_2) = \sigma_x^2/2$, то в точке 2 будут два независимых измерения, имеющих равные дисперсии.

В таком случае $a = 1/2$, $b = 1/2$, а $\hat{x}_2 = x_2/2 + (x_1 + V_1 \Delta t)/2 = (x_1 + x_2)/2 + V_1 \Delta t/2$, что очевидно.

Последующие оценки получаются аналогичным образом.

Точка J:

- а) измеряются величины x_j и V_j ;
- б) оценивается значение \tilde{x}_j по информации, полученной в предыдущей точке:

$$\tilde{x}_j = \hat{x}_{j-1} + V_{j-1} \Delta t;$$

- в) находится линейная оценка \hat{x}_j в виде $\hat{x}_j = ax_j + b\tilde{x}_j$, где

$$a = \frac{\sigma_x^{-2}}{\sigma_x^{-2} + D^{-1}(\tilde{x}_{j-1})}; \quad b = \frac{D^{-1}(\tilde{x}_{j-1})}{\sigma_x^{-2} + D^{-1}(\tilde{x}_{j-1})};$$

- г) дисперсия оценки \hat{x}_j определяется выражением:

$$D^{-1}(\hat{x}_j) = \frac{1}{\sigma_x^2} + D^{-1}(\tilde{x}_j) = \frac{1}{\sigma_x^2} \left[1 + \frac{1}{D(\hat{x}_j) / \sigma_x^2 + \xi^2} \right]$$

$$\text{или } \lambda_j = \frac{\xi^2 + \lambda_{j-1}}{1 + \xi^2 + \lambda_{j-1}}.$$

Второй параметр задачи $\lambda_j = D(\hat{x}_j) / \sigma_x^2$ показывает степень уменьшения дисперсии (повышения точности) оценки текущего местоположения НТС со временем, происходящего при увеличении количества шагов рекурсии с временной дискретностью Δt : $j \rightarrow \infty$. При $j = 1$ величина $\lambda_j = 1$; при $j \rightarrow \infty$ величина λ_j теоретически стремится к нулю.

Эффективность совместной обработки информации о местоположении и скорости наземного транспортного средства

В предыдущем разделе был введен параметр

$$\lambda_j = \frac{\xi^2 + \lambda_{j-1}}{1 + \xi^2 + \lambda_{j-1}},$$

позволяющий оценить, насколько увеличивается точность местоопределения НТС при использовании оптимального — по критерию минимума дисперсии $D(\hat{x}_j)$ — алгоритма совместной обработки информации о местоположении и скорости наземного транспортного средства.

На рис. 3 представлены графики зависимости степени повышения точности навигационного обеспечения НТС от количества шагов рекурсии при различных значениях безразмерного параметра ξ .

Величина ξ зависит от точности спидометра, применяемого наземным транспортным средством. На графике видно, что при использовании спидометра с нулевой погрешностью (если $\sigma_v = 0$, то $\xi = 0$) уже на десятом шаге итерации точность навигационного обеспечения увеличивается на 90%. На практике такие значения погрешности спидометра недостижимы: реальные значения погрешности $\xi = 0,1 \dots 0,4$. В этом случае рекурсивный алгоритм позволяет повысить точность местоопределения до 90–70%.

В случае большей погрешности ($\xi = 0,5$) точность навигационного обеспечения составит

60% уже на пятом шаге рекурсии, что также является положительным результатом. Такое значение ξ можно получить при движении транспортного средства со скоростью около 90 км/ч при погрешности спидометра, равной примерно 12%, и при погрешности местоопределения по сигналам СРНС около 10 м, получаемого с дискретностью $\Delta t = 1$ с.

Были построены графики зависимости степени повышения точности навигационного обеспечения НТС — λ — при различных скоростях движения V и различных погрешностях спидометра σ_v . Один из таких графиков приведен на рис. 4. При этом вводится третий безразмерный параметр задачи — $\delta = \sigma_v / V$, показывающий отношение среднеквадратического значения погрешностей измерения скорости движения V к этой скорости. Значение $\delta = 0,03$ соответствует погрешностям спидометра 3 км/ч при скорости движения НТС, равной 100 км/ч. Такое значение погрешности встречается у современных автомобильных спидометров высокого качества. В этом случае уже на десятом шаге рекурсии при движении по городу со скоростью 60 км/ч точность определения местоположения повышается на 90%. Даже при движении с более высокими скоростями точность повышается до 85%.

График на рис. 4 построен для наиболее часто встречающейся величины относительной погрешности спидометра $\delta = 0,05$. На нем видно, что при малых скоростях (до 30 км/ч) удастся увеличить точность местоопределения на 95%. При движении по городу (со скоростью 60 км/ч) точность повысится на 90%, а при движении по трассе с большой скоростью (более 90 км/ч) — почти на 80%.

Дальнейшие расчеты показали, что даже для случаев, когда скорость движения не удастся измерить достаточно точно (из-за плохого качества, износа либо неисправности спидометра, износа покрышек колес, проскальзывания резины и т. п. — погрешности определения скорости $\delta = 7-11\%$), все же точность определения местоположения повышается более чем на 60–70%.

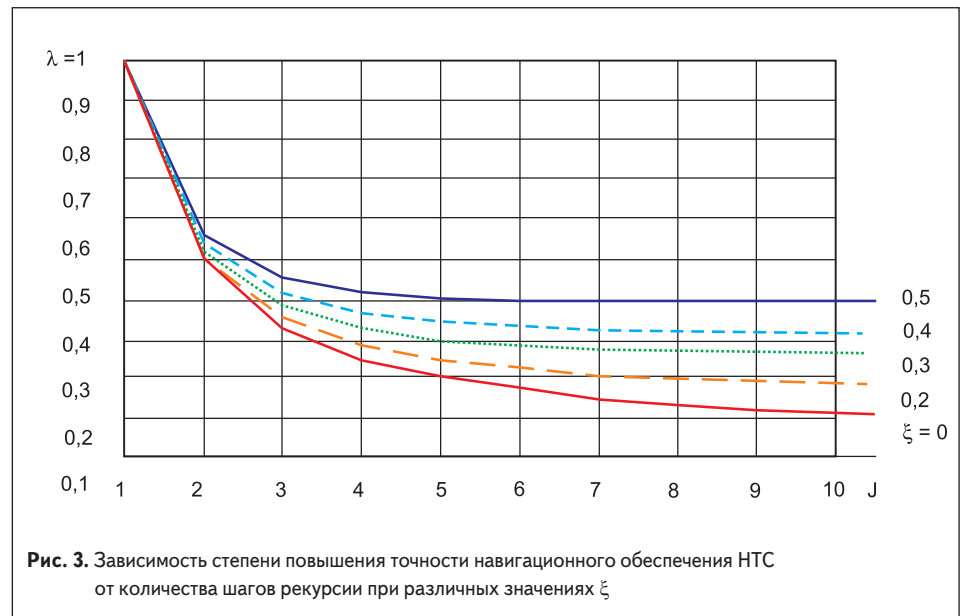


Рис. 3. Зависимость степени повышения точности навигационного обеспечения НТС от количества шагов рекурсии при различных значениях ξ

Счисление пути при временной недоступности необходимого созвездия системы СРНС

Если (x_0, y_0) — начальная (реперная) точка маршрута, полученная за один шаг до момента пропадания $t = t_0$ необходимой совокупности сигналов спутниковой РНС, $S(t)$ — текущее значение расстояния, пройденного НТС после этого момента времени, а $A(t)$ — азимут горизонтальной составляющей скорости движения НТС, то на момент времени $\tau = t - t_0$ координаты (x, y) наземного транспортного средства вычисляются по формулам (без учета рельефа местности):

$$x(\tau) = \int_0^\tau S(t) \sin A(t) dt + x_0;$$

$$y(\tau) = \int_0^\tau S(t) \cos A(t) dt + y_0.$$

Поскольку величины $S(t)$ и $A(t)$ определяются с некоторой погрешностью, то с течением времени погрешности $(\Delta x, \Delta y)$ счисления пути неограниченно растут. Кроме того, начальные значения координат (x_0, y_0) должны быть известны достаточно точно, что обеспечивается совместным действием датчиков счисления пути и приемника спутниковой РНС. Поэтому счисление пути используется двояко: для повышения точности местоопределения по показаниям радионавигационного датчика местоположения (текущих точек маршрута следования НТС) и для экстраполяции в течение ограниченного времени текущих значений координат НТС — при потере по тем или иным причинам показаний радионавигационного датчика местоположения. В случае потери необходимого количества сигналов СРНС допустимое время отсутствия координатного обеспечения НТС зависит от скорости движения автомобиля V , точности измерения скорости σ_v и направления движения автомобиля σ_α , а также от дискретности Δt проведения измерений.

В одномерном случае алгоритм вычислений по существу остается прежним. Линейная оценка \hat{x}_j по-прежнему находится в виде $\hat{x}_j = ax_j + bx_{j-1}$, где

$$\tilde{x}_j = \hat{x}_{j-1} + V_{j-1} \Delta t,$$

$$a = \frac{\sigma_x^{-2}}{\sigma_x^{-2} + D^{-1}(\hat{x}_{j-1})},$$

$$b = \frac{D^{-1}(\hat{x}_{j-1})}{\sigma_x^{-2} + D^{-1}(\hat{x}_{j-1})}.$$

Поскольку в отсутствие необходимых для местоопределения по спутниковой системе РНС сигналов величина σ_x неограниченно увеличивается, то величина $a \rightarrow 0$, а $b \rightarrow 1$.

Поэтому оптимальная оценка \hat{x}_j вычисляется по формуле $\hat{x}_j = \hat{x}_{j-1} + V_{j-1} \Delta t$, а дисперсия такой оценки есть $D(\hat{x}_j) = D(\hat{x}_{j-1}) + \sigma_v^2 \Delta t^2$, что является очевидным результатом решения задачи дискретного счисления пути при заданных выше исходных данных.

Предполагается следующий простейший рекурсивный алгоритм работы системы

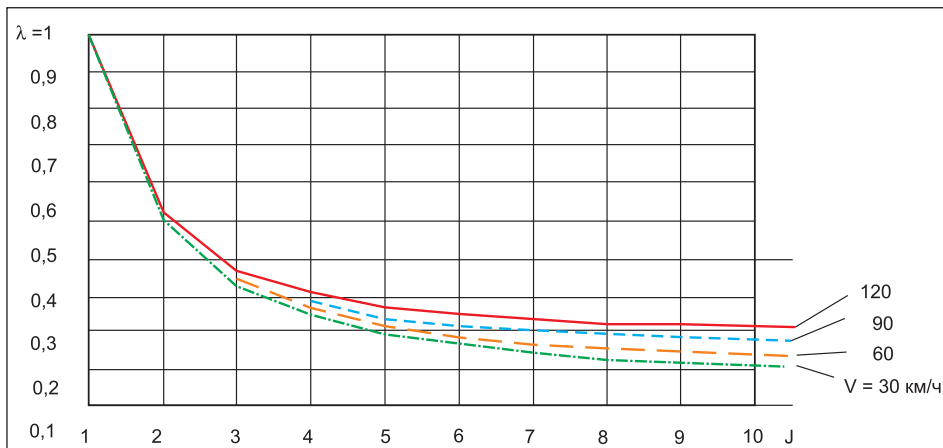


Рис. 4. Зависимость степени повышения точности навигационного обеспечения НТС от количества шагов рекурсии J при различных скоростях движения V ($\delta = 0,05$)

счисления пути. Каждая последующая точка x_j местоположения объекта вычисляется по координатам предыдущей x_{j-1} и значениям скорости НТС V_{j-1} . В результате накопленная погрешность определения местоположения НТС со временем увеличивается. Поэтому, исходя из допустимой точности местоопределения НТС на данной дорожной структуре $\sigma_{\text{макс}}$, можно определить допустимое время потери сигналов.

Если за это время необходимая совокупность сигналов спутниковой РНС не появляется, то некоторые авторы рекомендуют «обнулять» погрешность в отдельных реперных точках, где установлены соответствующие средства передачи координат реперов на борт НТС [4]. Но по ряду объективных причин такой вариант построения системы навигационного обеспечения НТС не получил развития [1].

Эффективность обработки информации о местоположении НТС при потере сигналов минимально необходимого созвездия СРНС

На рис. 5 приведена зависимость от времени t степени уменьшения точности местоопреде-

ления НТС σ_x при различных значениях скорости движения V и относительной точности измерения скорости, равной $\delta = 0,01$. При этом максимальная допустимая точность определения местоположения задана (для городской территории) величиной $\sigma_{\text{макс}} = 10$ м.

На графике (рис. 5) видно, что при малых скоростях движения (до 30 км/ч) величина $\sigma_{\text{макс}}$ достигается только приблизительно через 3 ч после начала равномерного прямолинейного движения НТС при условии, что точка начала движения была определена абсолютно точно. При движении на более высоких скоростях (свыше 60 км/ч и) величина $\sigma_{\text{макс}}$ теоретически достигается приблизительно через час после начала равномерного прямолинейного движения наземного транспортного средства.

При меньшей точности определения скорости движения ($\delta = 0,03$) — для случая потери координатного обеспечения по сигналам спутниковой РНС — можно продолжать движение по городу со скоростью 30–60 км/ч в течение примерно 20 мин (рис. 5). При большей скорости (90–120 км/ч) заданного предела точности хватит на 2–3 мин.

При менее точном определении скорости движения ($\delta = 0,04 \dots 0,1$) максимальная допустимая погрешность местоопределения будет достигаться значительно раньше.

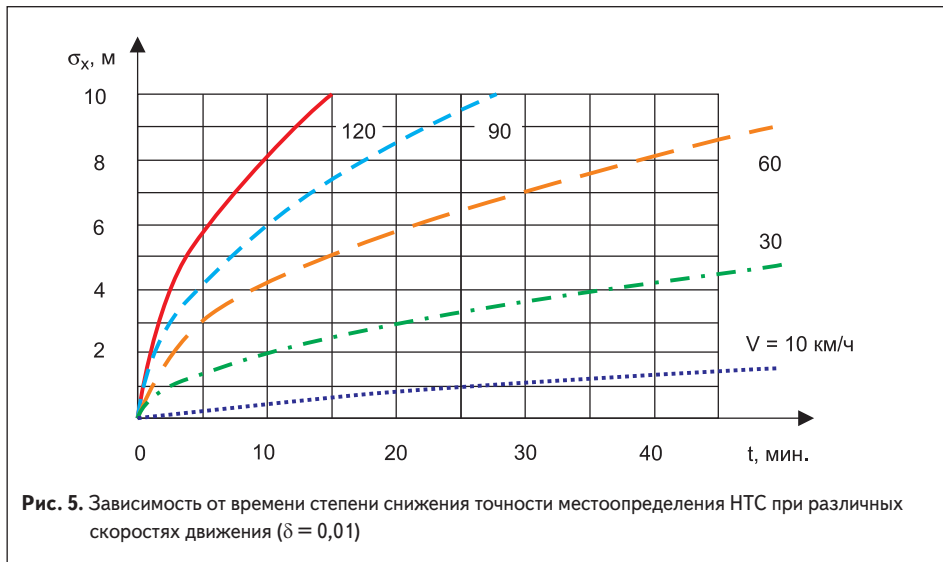


Рис. 5. Зависимость от времени степени снижения точности местоопределения НТС при различных скоростях движения V ($\delta = 0,01$)

При средней скорости движения по центру города, примерно равной 40 км/ч, максимальная допустимая погрешность местоопределения $\sigma_{\text{макс}}$ будет достигнута уже через 2–5 мин.

Обобщим полученные результаты на двумерный случай: движение наземного транспорта в сельской местности или по бездорожью.

На каждом шаге оценивания координат (x, y) нужно минимизировать средний квадрат расстояния от истинного положения НТС (x_0, y_0) до оценки (\hat{x}, \hat{y}) , что сводится к раздельной минимизации $\sigma_x^2 = D(\hat{x})$ и $\sigma_y^2 = D(\hat{y})$.

Для того чтобы определить σ_x и σ_y , следует поместить начало координат системы (\tilde{x}, \tilde{y}) в точку предыдущей оценки местоположения НТС (см. рис. 2).

По измерениям спидометра и гироскопа отклонение вдоль вектора \vec{V} образует одну полуось единичного эллипса рассеяния [1]: $a = \sigma_v V$, а другая полуось b определяется точностью гироскопа: $b = \sigma_a V$. Здесь σ_v — относительная точность спидометра, а σ_a — точность гироскопа (в радианах). Значит, $\sigma_r = a^2 + b^2 = V(\sigma_v^2 + \sigma_a^2)$.

Координаты σ_x и σ_y — это координаты пересечения касательных к единичному эллипсу с осями Ox и Oy соответственно [1].

Для их определения следует перенести начало координат системы (\tilde{x}, \tilde{y}) , в центр эллипса, а затем зафиксировать точку x_c (секущая) на оси Ox . Ей будут соответствовать две точки пересечения прямой $x(y) = x_c = \text{const}$ с единичным эллипсом рассеяния: (x_c, y_1) и (x_c, y_2) , пока не будет достигнута точка $x = \sigma_x$, где эти две точки сливаются в одну: $y_1 = y_2$. Значит, нужно найти точку $x = \sigma_x$.

Возьмем систему координат (x', y') в которой уравнение единичного эллипса рассеяния имеет канонический вид:

$$\frac{x'^2}{a^2} + \frac{y'^2}{b^2} = 1.$$

Возвратимся к нашей системе координат (x, y) , учитывая, что система (x', y') получается поворотом системы (x, y) на угол $\varphi = \bar{\alpha}$:

$$\begin{cases} x' = x \cos \varphi + y \sin \varphi, \\ y' = -x \sin \varphi + y \cos \varphi. \end{cases}$$

Значит, уравнение единичного эллипса рассеяния в системе координат (x, y) есть

$$1 = \frac{1}{a^2}(x \cos \varphi + y \sin \varphi)^2 + \frac{1}{b^2}(x \sin \varphi - y \cos \varphi)^2.$$

Это уравнение второго порядка, которое после тождественных преобразований выглядит так:

$$x^2(b^2 \cos^2 \varphi + a^2 \sin^2 \varphi) + 2(b^2 - a^2)xy \cos \varphi \sin \varphi + y^2(a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi) = a^2 b^2.$$

Выразим координату y через x : $\tilde{a}y^2 + \tilde{b}y + \tilde{c} = 0$.

Здесь:

$$\begin{aligned} \tilde{a} &= b^2 \cos^2 \varphi + a^2 \sin^2 \varphi, \\ \tilde{b} &= 2(b^2 - a^2)x \cos \varphi \sin \varphi, \\ \tilde{c} &= x^2(b^2 \cos^2 \varphi + a^2 \sin^2 \varphi) - a^2 b^2. \end{aligned}$$

Значит,

$$y_{1,2} = \frac{-\tilde{b} \pm \sqrt{\tilde{b}^2 - 4\tilde{a}\tilde{c}}}{2\tilde{a}}.$$

Нас интересует случай, когда $y_1 = y_2$. Это будет при $\tilde{b}^2 - 4\tilde{a}\tilde{c} = 0$, т. е. когда

$$4(b^2 - a^2)^2 x^2 \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi - 4(a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi)[x^2(b^2 \cos^2 \varphi + a^2 \sin^2 \varphi) - a^2 b^2] = 0$$

или

$$x^2[(b^2 - a^2)^2 \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi - (a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi)(b^2 \cos^2 \varphi + a^2 \sin^2 \varphi)] = -a^2 b^2 (a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi).$$

Отсюда

$$x^2 = \sigma_x^2 = a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi.$$

Аналогично

$$y^2 = \sigma_y^2 = a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi.$$

Заключение

В статье предложен рекурсивный алгоритм комплексного оценивания оптимального местоположения наземного транспортного средства, использующий информацию от приемоизмерителя спутниковой РНС, спидометра и гироскопического устройства, который представляет собой частный случай фильтрации Калмана [5].

Проведены расчеты допустимого времени потери сигналов необходимого созвездия спутниковой РНС при использовании датчиков счисления пути без существенной потери точности местоопределения, а также получена оценка степени увеличения точности местоопределения — в случае применения датчиков счисления пути при наличии необходимой совокупности сигналов спутниковой РНС.

Расчеты показали, что даже не очень точные спидометры позволяют повысить точность местоопределения по сигналам спутниковых РНС в 4–5 раз. При временном пропадании сигналов СРНС последняя точка (полученная при совместной обработке показаний СРНС, спидометра и гироскопа) может служить надежной реперной точкой, позволяющей в течение нескольких минут обеспечивать достаточно точное навигационное обеспечение НТС.

Датчиком счисления пути может служить сам приемоизмеритель спутниковой РНС, если из него в бортовой процессор БКРН выводить текущие значения составляющих вектора скорости движения НТС, определенные по Доплер-эффекту. Поскольку псевдодальности определяются по временной задержке радиосигналов, а мгновенные частоты являются производными по времени от полной фазы высокочастотных радиосигналов спутниковых РНС, то случайные отклонения псевдодальностей и Доплер-частот должны быть не коррелированными между собой и при их гауссовости — независимыми, т. е. должны удовлетворять условиям справедливости формулы (1). ■

Литература

1. Худяков Г. И. Транспортные информационно-управляющие радиоэлектронные системы. / СПб.: Изд-во СЗТУ, 2006.
2. ITS Handbook. — PIARC (World Road Association), 2011. (www.road-network-operations.piarc.org).
3. Худяков Г. И. Статистическая теория радиотехнических систем. / М.: Изд. центр «Академия», 2009.
4. Patent USA 4.878.170, G 06 F 15/50. Vehicle Navigation System/E. I. Zeevi. — Oct. 31, 1989.
5. Сеницын И. Н. Фильтры Калмана и Пугачева. / М.: Университетская книга, Логос, 2006.