

Использование GPS-приемников

в современных технологиях управления автотранспортом

Большое количество автолюбителей для полуавтоматического управления передвижением по сложной городской автодорожной сети используют на своих автомобилях в составе так называемых «навигаторов» GPS-приемники. Однако в силу разных причин статистические и динамические характеристики сертифицированных в России GPS-приемников обычно неизвестны. Это иногда вызывает недоуменные вопросы, когда навигатор неправильно проводит водителя по маршруту. Аналогичные вопросы возникают и у водителей городского наземного транспорта.

**Геннадий Худяков,
д. т. н., профессор
Кирилл Подушников**

В Санкт-Петербурге используются интеллектуальные транспортные системы мониторинга и управления городским пассажирским транспортом масштабов федерального округа, республики, края, области и города. Городская Система комплексной автоматизации транспорта (СКАТ) базируется на современных навигационно-коммуникационных технологиях и использует данные глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. Кроме того, в современные сотовые радиотелефоны встраиваются GPS-приемники.

В российской системе глобальной радионавигации ГЛОНАСС одной из характеристик точности оценки координат географических объектов является плановая (в горизонтальной плоскости) радиальная среднеквадратическая погрешность местоопределения σ , [1]. В аналогичной американской радиосистеме GPS в качестве основной меры точности местоопределения используется величина предвычисленной плановой круговой погрешности местоопределения *CEP* (Circular Error Probable). Величина *CEP*, при круговом рассеянии радионавигационных местоположений объекта, связана с величиной σ , соотношением [2]:

$$CEP = 1,2 \sigma,$$

На фирме GARMIN (а также Magellan) величину предвычисленной плановой круговой погрешности местоопределения (*CEP*) называют более точно: предвычисленная погрешность местоопределения — *EPE* (Estimated Positional Error) [2].

В системе GPS предусмотрена возможность искусственного искажения информации о си-

стемном времени и эфемеридах, которое не позволяет несанкционированным пользователям получать с помощью сигналов американской спутниковой радионавигационной системы GPS фактическую плановую круговую погрешность местоопределения *CEP*, меньшую 50 м (режим селективного доступа — Selective Availability, SA). В настоящее время режим селективного доступа в системе GPS не используется, но потенциально, по решению правительства США, он может быть введен в систему [1].

В то же время для надежной проводки по городской автодорожной сети центральных районов мегаполисов требуется точность местоопределения σ , порядка 5–10 м [1]. Практика использования GPS-приемников на частном автотранспорте говорит о том, что такая точность в статическом режиме местоопределения в современных GPS-приемниках обеспечивается.

Однако представляется актуальным вопрос о том, каково смещение радионавигационных координат движущегося автомобиля относительно его истинного местоположения (астизм какого порядка применяется в современных GPS-приемниках), а также какова точность местоопределения автомобиля в зависимости от скорости его движения, то есть какова надежность проводки автотранспорта по городским улицам с помощью GPS-навигатора (сервисная программа Route Guidance [1]).

В статье приводятся соответствующие экспериментальные данные и предварительные выводы по результатам их статистической обработки.

Постановка эксперимента

Экспериментальные исследования проводились с помощью GPS-приемника фирмы

GARMIN модели Nuvi 150 LMT (производства 2013 г.) на автомобиле фирмы Renault модели Grand Scenic 3. GPS-приемник устанавливался у ветрового стекла внутри автомобиля.

Для проведения экспериментальных исследований был выбран участок трассы А-128 Санкт-Петербург–Морье («Дорога Жизни») в промежутке от 29 до 39 км. Первый километровый столб находится в поселке Ириновка. Участок трассы проходил в основном с запада на восток, дважды отклоняясь в широтном направлении на ± 800 м.

Эксперименты проводились в ноябре 2013 г. в дневных условиях освещенности при температуре воздуха в пределах $0 \dots +5$ °С при пасмурной погоде, но без осадков. Хотя максимум 24-го цикла солнечной активности приходится на середину 2013 г. (со среднемесячным максимумом числа Вольфа около 65), во время проведения экспериментов сильных геомагнитных бурь и атмосферных возмущений синоптиками не отмечалось.

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем.

На правом краю проезжей части автотрассы намечались контрольные точки, расположенные напротив соответствующих километровых столбов. В этих точках в течение двух минут снимались показания GPS-приемника в формате XX°XX,XXX' (статический эксперимент). Это соответствовало дискретности отсчетов по широте 1,852 м и по долготе 0,926 м. Кроме того, снимались показания значений EPE в контрольных точках.

Затем проводилось несколько поездок с торможением, остановкой и разгоном до скорости 60 км/час. В этих поездках координаты фиксировались через каждые 2 с.

После этого на скорости 5, 10, 15 и 20 м/с (18, 36, 54 и 72 км/ч) фиксировались показания GPS-приемника в моменты проезда автомобилем контрольных точек (динамический эксперимент). Одиннадцать километровых столбов проходились на скоростях 36 и 72 км/час семь раз, что позволило получить выборку из 77 пар координат (широта и долгота) контрольных точек для каждой скорости.

Кроме того, координаты контрольных точек в системе WGS 84 находились на картах, взятых из интернет-сайтов www.wikimapia.org [3] и www.maps.yandex.ru [4].

Способ обработки экспериментальных данных

Для контрольных точек определялись средние значения их координат и размах выборочных значений.

Для поездок с торможением, остановкой и разгоном строились зависимости изменения координат автомобиля от времени.

Для динамического эксперимента проводилась полная статистическая обработка выборки $\{(\varphi_{j1}, \lambda_{j1}), (\varphi_{j2}, \lambda_{j2}), \dots, (\varphi_{jn}, \lambda_{jn})\}$ из координат контрольных точек, определенных для каждого значения скорости v_j относительно их статических координат ($v_j = 0$). При этом в расчет брались только минуты, десятые, сотые и тысячные минуты широты φ_j или долготы λ_j . Значение $j = 1$ соответствовало скорости $v_1 = 10$ м/с, значение $j = 2$ — скорости $v_2 = 20$ м/с.

Эмпирические (выборочные) средние значения $\bar{\varphi}_j$ и $\bar{\lambda}_j$ вычислялись по формулам [2]:

$$\bar{\varphi}_j = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_{ji} - \varphi_{0i}}{n},$$

$$\bar{\lambda}_j = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{ji} - \lambda_{0i}}{n}.$$

Эмпирические дисперсии $S_{\varphi_j}^2$ и $S_{\lambda_j}^2$ — по формулам:

$$S_{\varphi_j}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\varphi_{ji} - \varphi_{0i} - \bar{\varphi}_j)^2}{(n-1)},$$

$$S_{\lambda_j}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\lambda_{ji} - \lambda_{0i} - \bar{\lambda}_j)^2}{(n-1)}.$$

Оценивался также эмпирический коэффициент корреляции $r_{\varphi\lambda_j}$:

$$r_{\varphi\lambda_j} = \frac{\sum_{i=1}^n (\varphi_{ji} - \varphi_{0i} - \bar{\varphi}_j)(\lambda_{ji} - \lambda_{0i} - \bar{\lambda}_j)}{S_{\varphi_j} S_{\lambda_j} (n-1)}.$$

Затем вводилась плановая (в горизонтальной плоскости) топоцентрическая система Декартовых координат (x, y) : ось Ox направляется по местной параллели на восток, ось Oy — по местному меридиану на север. В этой системе координат вычислялись оценки средних значений величин отклонения координат автомобиля от его координат в контрольных точках \bar{x}_j и \bar{y}_j ($j = 1, 2$), а также оценки эмпирического среднего смещения \bar{M}_j ($j = 1, 2$) и радиального среднеквадратического значения погрешностей местоопределения $\hat{\sigma}_{r_j}$ ($j = 1, 2$) по формулам:

$$\bar{x}_j = 926 \bar{\lambda}_j, \bar{y}_j = 1852 \bar{\varphi}_j,$$

$$\bar{M}_j = |\bar{M}_j| = 1852 \sqrt{\bar{\varphi}_j^2 + \bar{\lambda}_j^2} / 4,$$

$$\hat{\sigma}_{x_j} = 926 \sqrt{S_{\lambda_j}^2}, \hat{\sigma}_{y_j} = 1852 \sqrt{S_{\varphi_j}^2},$$

$$\hat{\sigma}_{r_j} = 1852 \sqrt{S_{\varphi_j}^2 + S_{\lambda_j}^2} / 4.$$

При этом среднеквадратические отклонения σ_{M_j} величин M_j векторов эмпирического среднего отклонения $\bar{M}_j(x_p, y_p)$ от их эмпирических средних значений имеют приближительные оценки: $\sigma_{M_j} = \hat{\sigma}_r \approx \sigma_{r_j} \sqrt{n}$, а среднеквадратические отклонения величин $\hat{\sigma}_{r_j}$ от их несмещенных средних значений: $\sigma_{r_j} / \sqrt{2(n-1)}$.

Затем по формулам из пособия [1] рассчитывались эмпирические оценки средних по произвольному равновероятному значению дисперсии местоположения $\sigma_d^2 = \hat{\sigma}_r^2 / 2$, а также эквивалентных радиусов рассеяния $r_s^2 = \hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y \sqrt{1 - r_{\varphi\lambda}^2}$.

Наконец, вычислялись оценки полуосей a и b единичных эллипсов рассеяния навигационных местоположений автомобиля и их ориентация (угол Ψ) относительно оси координат Ox :

$$a, b \left. \vphantom{\begin{matrix} a \\ b \end{matrix}} \right\} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\sqrt{\sigma_d^2 + r_s^2} \pm \sqrt{\sigma_d^2 - r_s^2} \right),$$

$$\sin(2\Psi) = \frac{r_{\varphi\lambda} \hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y}{\sqrt{(\sigma_d^2 + r_s^2)(\sigma_d^2 - r_s^2)}}.$$

На графиках эмпирических координат автомобиля строились удвоенные эллипсы рассеяния — для визуального контроля проведенных вычислений.

Результаты обработки экспериментальных данных

В контрольных точках в течение двух минут (120 отсчетов) координаты имели радиальный размах в пределах 8 м, то есть плановая радиальная среднеквадратическая погрешность местоопределения σ_r была около 2 м. Показания величины EPE GPS-приемника обычно составляло 3–4 м при видимости 9–10 навигационных ИСЗ системы GPS. Эти значения EPE соответствуют величине $\sigma_r \approx 2,5\text{--}3,3$ м.

Различие координат километровых столбов, определенных по GPS-приемнику в системе WGS 84 и согласно Wikimapia- и Yandex-картам, варьировалось (в основном, по долготе) от -5 до $+25$ и от -36 до $+3$ м соответственно.

При равномерном торможении и разгоне заметных отклонений радионавигационных координат от маршрута следования автомобиля не наблюдалось.

На рис. 1 показаны результаты динамического эксперимента (при скоростях движения автомобиля $v = 10$ и 20 м/с), а также показаны удвоенные эмпирические эллипсы рассеяния,

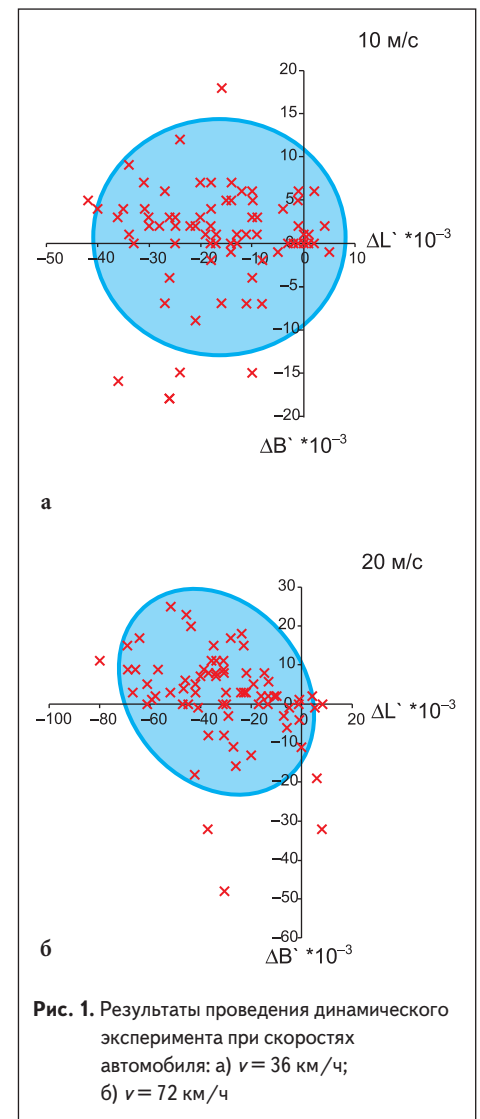
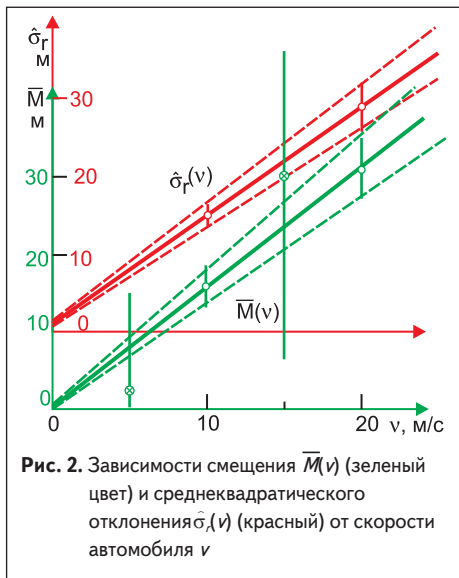


Рис. 1. Результаты проведения динамического эксперимента при скоростях автомобиля: а) $v = 36$ км/ч; б) $v = 72$ км/ч



содержащие теоретически 86% от общего количества координат радионавигационного местоположения автомобиля.

На рис. 1 видно, что при скорости $v = 10$ м/с (36 км/час) в экспериментальных данных имеется один промах (в тысячных угловых минут): точка $(-35, -35)$. При скорости $v = 20$ м/с (72 км/час) — два промаха: точки $(-53, 36)$ и $(-166, 27)$. Эти точки исключены из статистической обработки результатов экспериментов.

Эмпирические коэффициенты корреляции: $r_{\rho_{x1}} \approx -0,016$ и $r_{\rho_{x2}} \approx -0,35$. Эллипсы рассеяния радионавигационных местоположений автомобиля имеют большие полуоси $a_1 \approx 11,5$ м и $a_2 \approx 24,2$ м, малые — $b_1 \approx 10,2$ м и $b_2 \approx 16,3$ м, которые повернуты относительно осей координат на углы $\psi_1 \approx -4^\circ$ (эта величина не значимо отличается от 0) и $\psi_2 \approx -34 \pm 10^\circ$ [1].

На рис. 2 приведены величины эмпирического среднего смещения \bar{M} и оценка выборочного радиального среднеквадратического отклонения от среднего $\hat{\sigma}_r$ при величинах скорости движения автомобиля $v = 10$ и 20 м/с — вместе с 68%-ными доверительными интервалами.

На рис. 2 приведены также результаты предварительной оценки величин \bar{M} и $\hat{\sigma}_r$ для скорости движения $v = 5$ и 15 м/с — вместе с размахом экспериментальных данных. Сплошными линиями на рис. 2 показаны линейные интерполяции эмпирических зависимостей $\bar{M}(v)$ и $\hat{\sigma}_r(v)$ от скорости автомобиля v (м/с). Пунктирные линии показывают 68%-ные доверительные границы этих эмпирических зависимостей (регрессионный анализ в данном исследовании не проводился).

Вариации величины $\hat{\sigma}_r = EPE/1,2$ показаны на графике $\hat{\sigma}_r(v)$ рис. 2 при $v = 0$ вертикальной черной полосой.

Методические погрешности экспериментальных данных

Прежде чем делать выводы из результатов обработки экспериментальных данных, следует оценить погрешности местоопределения автомобиля, вызванные методикой проведения динамических экспериментов.

При полученных значениях $\hat{\sigma}_r$ ($\hat{\sigma}_{r1} \approx 15$ м, $\hat{\sigma}_{r2} \approx 30$ м) неточностью определения координат

контрольных точек, определенных в статическом режиме ($\hat{\sigma}_{r0} \approx 3$ м), можно пренебречь и считать, что координаты этих точек в системе WGS 84 определены точно.

При движении автомобиля мимо километрового столба время реакции оператора, фиксирующего в момент проезда столба показания GPS-приемника, на определении поперечной к трассе движения автомобиля координате практически не сказывается.

Что касается продольной координаты, то необходимо учесть следующее. Оператор заранее видит очередную километровую столб и готовится дотронуться пальцем до сенсорного экрана GPS-приемника — при проезде мимо столба. Поэтому реакция оператора складывается из времени фиксации момента проезда мимо столба (около 0,1 с [5]) и реакции пальца оператора (около 0,1 с [5]). Значит, можно оценить суммарную задержку в фиксации момента проезда очередного километрового столба промежуток времени в 0,2 с.

Далее. После момента активации дисплея GPS-приемник может зафиксировать текущие координаты автомобиля в течение 1 с (дискретность отсчетов GPS-приемника). Следовательно, задержку во времени фиксации продольной координаты автомобиля можно считать распределенной равномерно в промежутке $-0,8...+0,2$ с со средним значением $\bar{\Delta t} = -0,3$ с и среднеквадратическим отклонением от среднего $\sigma_t = 1/(2\sqrt{3}) \approx 0,29$ с. Это соответствует смещениям и среднеквадратическим отклонениям продольной координаты автомобиля при скорости $v_1 = 10$ м/с: $\Delta L_1 = -3$ м и $\sigma_{L1} \approx 3$ м; при $v_2 = 20$ м/с: $\Delta L_2 = -6$ м и $\sigma_{L2} \approx 6$ м. Поскольку движение автомобиля происходило в основном в долготном направлении, то на рис. 1 следует ввести смещение начала оси Ox влево на $2,8' \times 10^{-3}$ (для $v_1 = 10$ м/с) и на $5,6' \times 10^{-3}$ (для $v_2 = 20$ м/с).

Что же касается радиальных среднеквадратических отклонений $\hat{\sigma}_{rj}$, $j = 1,2$, то их следует уменьшить — с учетом величин рассмотренных выше методических погрешностей местоопределения — по формуле:

$$\hat{\sigma}_{rj} = \sqrt{\hat{\sigma}_{rj}^2 - \sigma_{Lj}^2}.$$

Это дает в результате: $\hat{\sigma}_{r1} \approx 15,1$ м, $\hat{\sigma}_{r2} \approx 28,6$ м.

Предварительные выводы из проведенных экспериментов

- В режиме статики фактическая точность местоопределения оценивается величиной $\hat{\sigma}_r$, около 3 м.
- При увеличении скорости движения автомобиля рассеяния точек радионавигационного местоположения растет. Ориентировочная зависимость $\hat{\sigma}_r(v)$ определяется выражением: $\hat{\sigma}_r(v) \approx 1,6 + 1,35v$. Поэтому, например, при скорости $v = 50$ м/с (180 км/ч) величина $\hat{\sigma}_r$ составит около 70 м.
- Фактическая точность местоопределения при однократном отсчете по GPS-приемнику определяется величиной $\hat{\sigma}_r$, около 2 м: точка графика $\hat{\sigma}_r(v)$ при $v = 0$.
- Зависимость $\bar{M}(v)$ можно аппроксимировать функцией вида $\bar{M}(v) = 1,2v$. Это значит, что GPS-приемник Nuvi 150 LMT как следящая

система имеет астатизм I порядка с постоянной времени около $\tau \approx 2,5$ с, так как именно такое значение величины τ дает продольное смещение координат $-M(v)$. Если привлечь к показаниям GPS-приемника показания автомобильного спидометра, то постоянное смещение $\bar{M}(v)$ можно компенсировать почти полностью [6].

В 1990-х годах было выяснено: если для отслеживания динамики морских и речных судов постоянная времени радионавигационных приборов должна быть около 15 с, то для автотранспорта, как более динамичного транспортного средства, — не более 4 с. Исследованный GPS-приемник удовлетворяет последнему требованию. Как показано в статье [6], комплексирование GPS-приемника с автомобильным спидометром позволяет также существенно уменьшить зависимость величины σ_r от скорости v движения автомобиля.

Заключение

Исследование динамических статистических характеристик автомобильных GPS-приемников вызывает большой практический интерес, так как позволяет понять, почему бортовой комплекс сухопутной навигации (так называемый «навигатор») иногда работает неадекватно: заводит в тупики, неправильно идентифицирует улицы и топографические объекты и т. п.

Однако проведение таких исследований весьма затруднительно, так как для этого нужны приборы, позволяющие при движении автомобиля определять его местоположение с точностью 2–3 м.

В статье предложен метод решения задачи точного местоопределения автомобиля «на ходу» с помощью местных предметов (не обязательно километровых столбов) и проведены предварительные экспериментальные исследования на основе предложенного метода.

Результаты экспериментов показали высокую эффективность предложенной методики и выявили основные статистические характеристики приемников глобальных спутниковых систем радионавигации. Дальнейшие исследования с помощью этой методики должны уточнить полученные данные, привести к усовершенствованию вторичной обработки данных в этих приемниках и к повышению качества работы бортовых комплексов сухопутной навигации. ■

Авторы благодарят Н. И. Ефремову за помощь в сборе экспериментальных данных.

Литература

1. Худяков Г. И. Транспортные информационно-управляющие радиоэлектронные системы: Уч. пособие. СПб.: Изд-во СЗТУ. 2003.
2. www.wikipedia.org.
3. www.wikimapia.org.
4. www.maps.yandex.ru.
5. www.google.ru.
6. Худяков Г. И., Белова А. А. Эффективность применения датчиков числения пути для радионавигационного обеспечения наземного транспорта, использующего спутниковые РНС. Записки Горного института. Т. 205. 2014 (в печати).