

С. ВАН, Ж. ТУ, Ц. ХАНЬ, Ж. ЧЖАН, Л. ФАНЬ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРЕХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПО ДАННЫМ GPS

Сопоставляются три метода определения скорости по данным GPS, которые основаны на дифференцировании фазы несущей, прямых доплеровских измерениях и технологии прецизионного точечного позиционирования. Приведены результаты статических и кинематических экспериментов с реальными данными GPS.

Ключевые слова: GPS, оценивание скорости, фаза несущей, доплеровские измерения, прецизионное точечное позиционирование.

Введение

Основными глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС) являются американская GPS, российская ГЛОНАСС, европейская Galileo и китайская BeiDou. Несмотря на то что в последние годы наблюдается развитие всех ГНСС, практически в каждом приемнике используется GPS [1, 2]. Определение скорости играет важную роль, в частности в задачах навигации транспортных средств, управлении беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) и прецизионной агротехнике. Скорость также используется при калибровке инерциальных навигационных систем (ИНС) и в аэрогравиметрии [3, 4]. Она же необходима и для фиксации перемещения приемника GPS в режиме реального времени [5]. Таким образом, исследование эффективности оценивания скорости системой GPS представляется важнейшей задачей.

Методы определения скорости GPS можно разделить на дифференциальные и точечные. Дифференциальный метод предполагает использование данных от опорной станции, имеющей ограниченную область покрытия [6, 7]; для точечного же метода достаточно данных лишь приемника потребителя. Наиболее известные методы точечного определения скорости основаны на дифференцировании фазы несущей (ДФН), прямых доплеровских измерениях (ДИ) и технологии прецизионного точечного позиционирования – Precise Point Positioning (PPP). Автор исследования, посвященного ДФН [8], предложил метод, основанный на использовании одно-

Ван Синсин. Аспирант, Национальный центр времени, Китайская академия наук (Сиань, Китай); Университет Китайской академии наук (Пекин, Китай).

Ту Жуй. Профессор, Национальный центр времени, Китайская академия наук; Главная лаборатория точной навигации и времени, Китайская академия наук (Сиань, Китай); Университет Китайской академии наук.

Хань Цзюньцян. Младший научный сотрудник, Национальный центр времени, Китайская академия наук; Университет Китайской академии наук.

Чжан Жуй. Младший научный сотрудник, Национальный центр времени, Китайская академия наук; Университет Китайской академии наук.

Фань Лихун. Младший научный сотрудник, Национальный центр времени, Китайская академия наук; Университет Китайской академии наук.

го и того же набора эфемерид для расчета координат спутника и смещений часов в последовательных эпохах, что обеспечивает решение задачи определения скорости с точностью до нескольких мм/с. В работе [9] представлен усовершенствованный метод ДФН, для которого не требуется знание скорости спутников; эффективность метода была подтверждена данными статических и кинематических натурных испытаний, которые показали, что усовершенствованный метод ДФН позволяет добиться точности определения скорости, эквивалентной дифференциальным методам GPS. Автор [10] применил метод ДФН для ограничения роста погрешности ИНС в условиях ограниченного приема GPS-сигналов. В работе [11] метод ДФН применялся в сочетании с бесплатформенной ИНС с использованием двухскоростного фильтра Калмана, позволившего получить прецизионное решение за малое время. В исследовании метода ДИ [12] указано, что точность оценивания скорости на уровне нескольких см/с достижима в условиях открытой верхней полусферы, а в работах [13, 14] показано, что точность ДИ зависит главным образом от точности доплеровских измерений, а не от динамики объекта. Автор [15] объединил ДФН и ДИ, получив более высокую точность по сравнению с отдельными методами. В исследовании [16] с использованием PPP-технологии представлен метод определения перемещения с погрешностью 1-2 см при времени сходимости процедуры около 1 мин.

Несмотря на то что три указанных выше метода измерения скорости активно исследовались, их всесторонний анализ и сравнение до сих пор не проводились. Это сделано в настоящей работе применительно к статическим и динамическим экспериментам. Проводится анализ эффективности использования упомянутых методов при дискретности поступления измерений 1 с и 30 с, а также анализируется метод ДФН при использовании одно- и двухчастотных безионосферных комбинаций измерений с различной дискретностью их поступления. На подвижном основании в качестве эталона скорости используются производные координат, вычисленные с помощью программного обеспечения для постобработки Inertial Explorer (ПО ИЕ). Проанализирована эффективность использования бортовых эфемерид в методах на основе ДФН и ДИ.

Три метода определения скорости

Метод ДФН

Уравнение измерения фазы несущей можно записать в виде

$$\lambda\Phi_{(r)}^s = \rho_{(r)}^s - (\delta t_r - \delta t_s)_{(ti)} c - \lambda N_{(ti)}^s - \delta^s_{ion(ti)} + \delta^s_{trop(ti)} + \varepsilon_{\varphi(ti)}^s, \quad (1)$$

где нижние индексы r и s обозначают приемник и спутник, ti – эпоху, $\rho_{(r)}^s$ – геометрическое расстояние между спутником и приемником, Φ – соответствующее измерение фазы несущей, λ – длину волны фазы несущей, δt_r и δt_s – смещения часов приемника и спутника; c – скорость света, $N_{(ti)}^s$ – неоднозначность фазы несущей, $\delta^s_{ion(ti)}$ и $\delta^s_{trop(ti)}$ – ионосферную и тропосферную задержки; $\varepsilon_{\varphi(ti)}^s$ – шумы измерений. Другие погрешности, например смещение фазового центра антенны, эффект накрутки фазы несущей (wind-up-эффект), вращение Земли и релятивистский эффект, можно скорректировать с помощью существующих моделей, поэтому они не учитываются в (1).

Если предположить, что в течение двух последовательных эпох в приемнике отсутствуют срывы слежения за фазой несущей, разность двух последовательных измерений ее будет иметь вид

$$\Delta\lambda\Phi_{(t_1,2)}^s = \Delta\rho_{(t_1,2)}^s - \Delta\delta t_{r(t_1,2)}c + \Delta\delta t_{s(t_1,2)}c - \Delta\delta_{ion(t_1,2)}^s + \Delta\delta_{trop(t_1,2)}^s + \Delta\varepsilon_{\varphi(t_1,2)}^s, \quad (2)$$

где Δ означает разность соответствующих величин для двух соседних эпох. В разностных измерениях (2) ионосферные и тропосферные задержки уменьшаются или устраняются, а целочисленная неоднозначность фазы несущей устраняется в силу принятого допущения об отсутствии срывов слежения.

Расстояние между спутником и приемником можно выразить в виде формулы [17]

$$\rho_{(ti)}^s = (\mathbf{e}_{(ti)}^s, \mathbf{R}_{(ti)}^s - \mathbf{r}_{(ti)}), \quad (3)$$

откуда

$$\begin{aligned} \Delta\rho_{(t_1,2)}^s &= (\mathbf{e}_{t_2}^s, \mathbf{R}_{(t_2)}^s - \mathbf{r}_{(t_2)}) - (\mathbf{e}_{t_1}^s, \mathbf{R}_{(t_1)}^s - \mathbf{r}_{(t_1)}) \\ &= (\mathbf{e}_{t_2}^s, \mathbf{R}_{(t_2)}^s) - (\mathbf{e}_{t_1}^s, \mathbf{R}_{(t_1)}^s) - (\mathbf{e}_{t_2}^s, \mathbf{r}_{(t_2)}) + (\mathbf{e}_{t_1}^s, \mathbf{r}_{(t_1)}). \end{aligned} \quad (4)$$

где $\mathbf{R}_{(ti)}^s$ и $\mathbf{r}_{(ti)}$ – радиус-векторы положения соответственно спутника и приемника в эпохе ti , $\mathbf{e}_{(ti)}^s = \frac{\mathbf{R}_{(ti)}^s - \mathbf{r}_{(ti)}}{|\mathbf{R}_{(ti)}^s - \mathbf{r}_{(ti)}|}$ – единичный вектор линии прямой видимости, а $(\mathbf{R}^s, \mathbf{r})$ – скалярное произведение векторов \mathbf{R}^s и \mathbf{r} .

Используя выражение $\mathbf{r}_{(t_2)} = \mathbf{r}_{(t_1)} + \Delta\mathbf{r}$, где $\Delta\mathbf{r}$ – изменение местоположения приемника за период времени $[t_1, t_2]$, уравнение (4) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \Delta\rho_{(t_1,2)}^s &= -(\mathbf{e}_{t_2}^s, \Delta\mathbf{r}) + (\mathbf{e}_{t_2}^s, \mathbf{R}_{t_2}^s) - (\mathbf{e}_{t_1}^s, \mathbf{R}_{t_1}^s) - (\mathbf{e}_{t_2}^s, \mathbf{r}_{(t_1)}) + (\mathbf{e}_{t_1}^s, \mathbf{r}_{(t_1)}) \\ &= -(\mathbf{e}_{t_2}^s, \Delta\mathbf{r}) + (\mathbf{e}_{t_2}^s, \mathbf{R}_{t_2}^s - \mathbf{r}_{(t_1)}) - (\mathbf{e}_{t_1}^s, \mathbf{R}_{t_1}^s - \mathbf{r}_{(t_1)}). \end{aligned} \quad (5)$$

Согласно (5), (2) для определения скорости перемещения приемника применима формула $\mathbf{v} = \frac{\Delta\mathbf{r}}{t_2 - t_1}$.

Метод ДИ

При наличии относительного движения между приемником и спутником частота несущего сигнала GPS, полученного приемником, отличается от частоты несущего сигнала, переданного спутником. Такое различие частот называется доплеровским сдвигом частоты. Величина измеренного доплеровского сдвига представляет собой мгновенное значение наблюдаемой скорости изменения фазы несущей. Дифференцируя уравнение (1), можно получить следующее уравнение:

$$\lambda D_{(ti)}^s = \dot{\rho}_{(ti)}^s - (\dot{\delta}t_r - \dot{\delta}t_s)_{(ti)}c - \dot{\delta}_{ion(t_1)}^s + \dot{\delta}_{trop(t_1)}^s + \varepsilon_{D(ti)}^s, \quad (6)$$

где $D_{(ti)}^s$ – доплеровский сдвиг частоты, $\varepsilon_{D(ti)}^s$ – измерительный шум.

Метод PPP

PPP – это технология получения высокоточных координат по измерениям сигналов ГНСС с использованием уточненных эфемерид и поправок к шкалам времени

где m_{wz}^s – картирующая функция для влажной составляющей тропосферной задержки, n – количество спутников, $\mathbf{x}_{1 \times 3}$, $\mathbf{v}_{1 \times 3}$, $\mathbf{a}_{1 \times 3}$ – векторы перемещения, скорости и ускорения приемника; tro_{wet} – влажная составляющая зенитной тропосферной задержки, $\delta_{\varphi_c}^s$ и $\delta_{P_c}^s$ – дисперсии шума для измерений фазы несущей и псевдодальности.

Уравнение формирующего фильтра для вектора состояния можно записать в виде

$$\mathbf{X}_{ii} = \mathbf{F}_{ii} \mathbf{X}_{i,t_{i-1}} + \mathbf{W}_{ii}, \mathbf{W}_{ii} \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{Q}_w), \quad (13)$$

где \mathbf{F} – переходная матрица, а \mathbf{W} – вектор порождающего шума, имеющий центрированное гауссовское распределение с ковариационной матрицей \mathbf{Q}_w . Динамика приемника по каждому направлению моделируется марковским процессом второго порядка, где ускорение представлено в виде винеровского процесса. Зенитная тропосферная задержка также описывается как винеровский процесс, смещение часов приемника представляет собой белый шум, а фазовая неоднозначность – константу. Матрицы \mathbf{F} , \mathbf{Q}_w имеют вид:

$$\mathbf{F}_{ii} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{3 \times 3} & \tau \mathbf{E}_{3 \times 3} & 0.5\tau^2 \mathbf{E}_{3 \times 3} & 0 & 0 & \mathbf{0} \\ 0 & \mathbf{E}_{3 \times 3} & \tau \mathbf{E}_{3 \times 3} & 0 & 0 & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & \mathbf{E}_{3 \times 3} & 0 & 0 & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{E}_{n \times n} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{Q}_w = \tau \cdot \begin{bmatrix} \tau & \tau^3 & \tau^2 & 0 & 0 & \mathbf{0} \\ 20 q_a^2 \mathbf{E}_{3 \times 3} & 8 q_a^2 \mathbf{E}_{3 \times 3} & 6 q_a^2 \mathbf{E}_{3 \times 3} & 0 & 0 & \mathbf{0} \\ \tau^3 & \tau^2 & \tau^1 & 0 & 0 & \mathbf{0} \\ 8 q_a^2 \mathbf{E}_{3 \times 3} & 3 q_a^2 \mathbf{E}_{3 \times 3} & 2 q_a^2 \mathbf{E}_{3 \times 3} & 0 & 0 & \mathbf{0} \\ \tau^2 & \tau^1 & q_a^2 \mathbf{E}_{3 \times 3} & 0 & 0 & \mathbf{0} \\ 6 q_a^2 \mathbf{E}_{3 \times 3} & 2 q_a^2 \mathbf{E}_{3 \times 3} & q_a^2 \mathbf{E}_{3 \times 3} & 0 & 0 & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & 0 & q_z^2 & 0 & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_t^2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0}_{n \times n} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где τ – интервал дискретизации, \mathbf{E} – единичная матрица, $\mathbf{0}$ – нулевая матрица, q_a , q_z – среднеквадратические отклонения порождающих шумов для ускорения и тропосферной задержки, q_t – среднеквадратическое отклонение смещения часов приемника.

Необходимо также учитывать изменение количества используемых спутников, когда с течением времени одни спутники исчезают из поля видимости, а другие появляются, в силу чего модифицируются вектор (11) и матрицы (10), (12), (14), (15).

С помощью уравнения измерения (9) и уравнения состояния (13) можно легко получить скорость по данным GPS, используя фильтр Калмана [22]:

$$\mathbf{X}_{ii,t_{i-1}}^v = \mathbf{F}_{ii} \mathbf{X}_{i,t_{i-1}}^v, \quad (16)$$

$$\mathbf{Q}_{ii,t_{i-1}} = \mathbf{F}_{ii} \mathbf{Q}_{i,t_{i-1}} \mathbf{F}_{ii}^T + \mathbf{Q}_w, \quad (17)$$

$$\mathbf{K}_{ii} = \mathbf{Q}_{ii,t_{i-1}} \mathbf{A}_{ii}^T (\mathbf{A}_{ii} \mathbf{Q}_{ii,t_{i-1}} \mathbf{A}_{ii}^T + \mathbf{P}_{ii})^{-1}, \quad (18)$$

$$\mathbf{X}'_{ii} = \mathbf{X}'_{ii,t_{i-1}} + \mathbf{K}_{ii} (\mathbf{L}_{ii} - \mathbf{A}_{ii} \mathbf{X}'_{ii,t_{i-1}}), \quad (19)$$

$$\mathbf{Q}_{ii} = (\mathbf{E} - \mathbf{K}_{ii} \mathbf{A}_{ii}) \mathbf{Q}_{ii,t_{i-1}}, \quad (20)$$

где \mathbf{X}' – оценка вектора \mathbf{X} , \mathbf{Q} – ковариационная матрица погрешности оценивания, \mathbf{K} – коэффициент усиления фильтра Калмана.

Результаты обработки натуральных данных

Описание экспериментов



Рис. 1. Траектория движения объекта

Статические и динамические эксперименты проводились с применением трех методов измерения скорости. В статическом эксперименте были задействованы два набора данных, один из которых содержал данные, полученные на 10 ГНСС-станциях в течение 7 дней (24–30 марта 2018 г.) с интервалом дискретности измерений 30 с; второй набор данных был получен на базовой станции 30 марта 2018 г. в период с 6:46:18 по 13:14:44 (UTC) при интервале дискретности 1 с. Динамический эксперимент проводился в Пекине 30 марта 2018 г. с 10:00 до 12:00 (UTC) с интервалом дискретности 1 с. На рис. 1 показана траектория движения объекта.

При определении скорости методом ДФН для оценивания параметров использовался метод наименьших квадратов. Оцениваемыми параметрами являлись $\Delta \mathbf{r}$ и $\Delta \delta t_{r(t1,2)}$. Для коррекции изменений ионосферной задержки при определении скорости были использованы безыоносферные комбинации измерений фазы несущей, а коррекция изменений тропосферной задержки выполнялась с помощью модели Саастмойнена и глобальной картирующей функции (GMF) [23].

Определение скорости по ДИ также опиралось на метод наименьших квадратов. Оцениваемыми параметрами являлись v и δt_r . Точность определения скорости при этом в значительной степени зависела от уровня измерительного шума в ДИ, а изменения ионосферной и тропосферной задержек не учитывались.

В методе на основе PPP для оценивания параметров использовался фильтр Калмана. Ионосферная и тропосферная задержки были скорректированы как и при использовании ДФН. Остаточная погрешность влажной составляющей тропосферной задержки моделировалась винеровским процессом, смещение часов приемника – гауссовым белым шумом, а неоднозначности фазовых измерений полагались посто-

янными; все они были включены в состав вектора состояния (11). В эксперименте были использованы данные IGS по орбитам и часам спутников, предоставляемые для постобработки. В табл. 1 представлены основные сведения о проводимых экспериментах

Т а б л и ц а 1

Особенности трех методов оценивания скорости

Модели	ДФН		ДИ		PPP	
Измерения	Фаза несущей		Доплеровский сдвиг		Псевдодалность, фаза несущей	
Частота сигнала	L1, L2		L1		L1, L2	
Весы для измерений	Зависят от угла восхождения спутника		Зависят от угла восхождения		Зависят от угла восхождения	
Оцениваемые параметры	Δr $\Delta \delta t_{r(t1,2)}$		v $\dot{\delta} t_r$		$x, v, a, t_{ro_wet}, \delta t_r$ $[N^1_{IF} \ N^2_{IF} \ \dots \ N^n_{IF}]$	
Учет погрешностей	Орбита спутника	IGS	Орбита спутника	IGS	Орбита спутника	IGS
	$\Delta \delta t_{st(t1,2)}$	IGS	$\dot{\delta} t_s$	IGS	δt_s	IGS
	$\Delta \delta_{ion}$	Безионосферные комбинации измерений	$\dot{\delta}_{ion}$	Не учитывается	δ_{ion}	Безионосферные комбинации измерений
	$\Delta \delta_{trop}$	Модель Саастмойнена	$\dot{\delta}_{trop}$	Не учитывается	δ_{trop}	Модель Саастмойнена, оценка остаточной погрешности влажной составляющей
Метод оценивания	Метод наименьших квадратов		Метод наименьших квадратов		Фильтр Калмана	

Анализ качества кинематических решений, моделируемых с использованием статических измерений

При этом истинное значение скорости полагалось равным нулю. На рис. 2 показаны графики погрешностей северной (N), восточной (E) и вертикальной (U) составляющих скорости, полученные тремя методами по измерениям на станции ALIC за 24 марта 2018 г. Их пиковые значения при использовании ДФН не превышали 2 мм/с для всех трех составляющих. В случае применения ДИ эти значения составляли не более 5 см/с для N , E и 2 дм/с – для U . Наконец, при использовании PPP пиковые

значения не превышали 1 мм/с для N , E и 2 мм/с – для U . Таким образом, наихудший результат оказался у ДИ, а наилучший – у PPP.

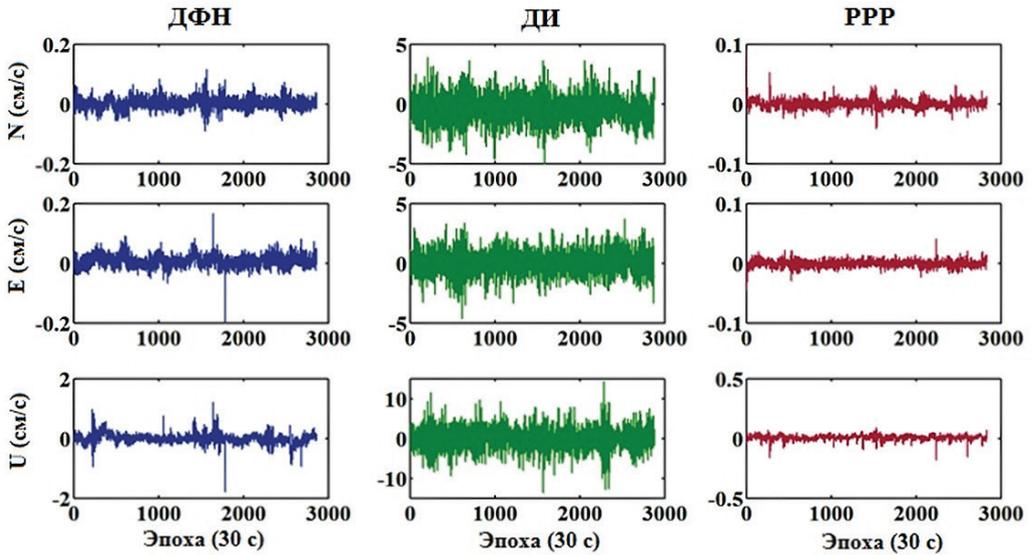


Рис. 2. Составляющие скорости, полученные по данным станции ALIC от 24 марта 2018 г.

В табл. 2 представлены среднеквадратические значения погрешностей выработки составляющих скорости, полученные в аналогичных условиях по данным упомянутых 10 станций на интервале 7 дней. Точность при использовании ДФН и PPP достигает единиц мм/с, а точность ДИ – нескольких см/с. Горизонтальные составляющие определяются точнее. Если сравнивать результаты для PPP и ДФН, то их точность примерно одинакова в горизонте, однако по вертикали PPP обладает преимуществом.

Таблица 2

Среднеквадратические значения погрешностей выработки составляющих скорости, полученные по данным 10 станций в течение 7 дней (дискретность 30 с)

Составляющие	N (см/с)	E (см/с)	U (см/с)
ДФН	0,05	0,04	0,28
ДИ	0,98	0,75	2,06
PPP	0,05	0,04	0,16

На рис. 3 показаны значения скорости, полученные с разных станций; эти данные можно использовать для дальнейшего анализа эффективности различных методов. В частности, для ДФН значения скорости менее 2 мм/с были получены на пяти станциях, что составляет 50% от общего их числа. Для ДИ значения скорости на всех станциях находились в пределах 1–4 см/с, а для метода PPP эти значения составляли менее 2 мм/с на восьми станциях (80% станций). Вместе с тем на семи станциях (70%) были получены значения скорости ниже, чем для ДФН. Таким образом, точность ДИ была самой низкой на различных станциях, тогда как результаты PPP более устойчивы по сравнению с ДФН.

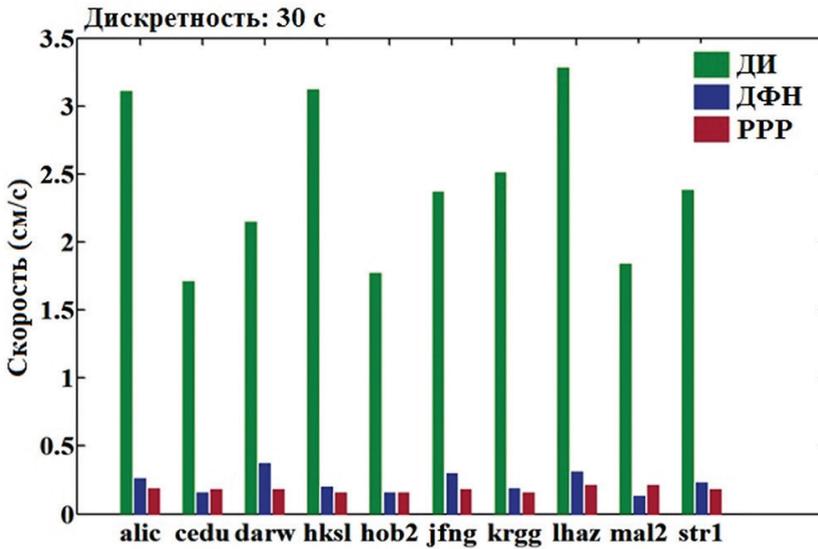


Рис. 3. Среднеквадратические значения погрешностей выработки составляющих скорости, полученные по данным отдельных станций

Поскольку скорость является мгновенной, в кинематических решениях обычно используется дискретность 1 с. В табл. 3 указаны среднеквадратические значения погрешностей выработки составляющих скорости, полученные по данным с базовой станции. Рассматриваемые методы оценивания скорости при дискретности 1 с ранжируются по точности от лучшей к худшей: PPP, ДФН и ДИ. Следовательно, при моделировании кинематических решений с использованием статических данных у ДИ самая низкая точность, а PPP превосходит ДФН и может применяться для мониторинга сейсмических процессов, деформаций и в других целях.

Таблица 3

Среднеквадратические значения погрешностей выработки составляющих скорости, полученные по данным одной станции (дискретность – 1 с)

Составляющие	N (см/с)	E (см/с)	U (см/с)
ДФН	0,16	0,12	0,32
ДИ	1,20	1,09	2,75
PPP	0,04	0,06	0,09

Согласно приведенным результатам, для кинематических решений с использованием статических данных PPP обеспечивает наиболее точное определение скорости, однако для этого метода требуются двухчастотные измерения псевдодальности и фазы несущей, а большинство недорогих приемников могут принимать только одночастотные измерения. ДИ применимы для одночастотных измерений, но их точность оставляет желать лучшего. Метод ДФН использует безыоносферные комбинации двухчастотных измерений фазы несущей для корректировки изменения ионосферной задержки. Далее исследуется влияние изменения ионосферной задержки

на точность определения скорости на основе ДФН при различной дискретности поступления данных.

В табл. 4 представлены среднеквадратические значения скоростных кинематических решений по данным базовой станции, полученные с помощью одночастотных (L1) измерений и безыоносферных (iono-free, IF) комбинаций двухчастотных измерений при их различной дискретности. При дискретности 1 с результаты для L1 и IF практически одинаковы. По мере увеличения дискретности точность определения скорости для IF выше, чем для L1.

Таблица 4

Среднеквадратические значения погрешностей выработки составляющих скорости, полученные методом ДФН с использованием одночастотных L1-измерений и IF-комбинаций двухчастотных измерений при различной дискретности

Дискретность (с)	L1			IF		
	N (см/с)	E (см/с)	U (см/с)	N (см/с)	E (см/с)	U (см/с)
1	0,15	0,11	0,31	0,16	0,12	0,32
5	0,09	0,05	0,16	0,09	0,06	0,09
15	0,07	0,06	0,11	0,07	0,06	0,10
30	0,04	0,05	0,09	0,02	0,03	0,07

На рис. 4 и 5 показаны графики погрешностей выработки составляющих скорости, полученные при использовании измерений L1 и IF-комбинаций с дискретностью 1 с и 30 с. Как видно из графиков, при дискретности 1 с результаты для L1 и IF близки, а при дискретности 30 с L1 уступает в точности IF.

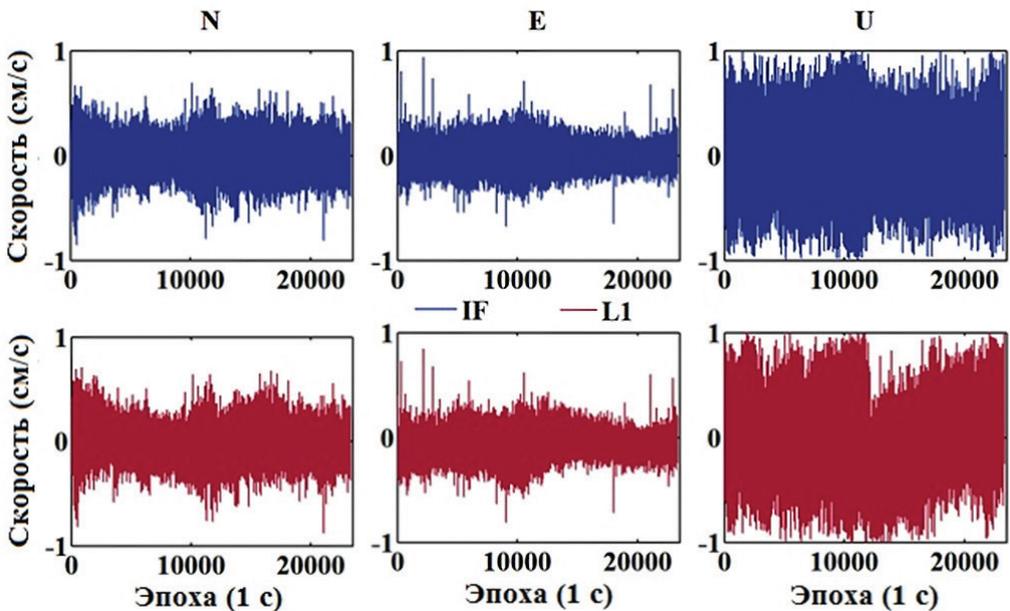


Рис. 4. Погрешности выработки составляющих скорости, полученные методом ДФН с использованием одночастотных L1-измерений и IF-комбинаций двухчастотных измерений при дискретности 1 с

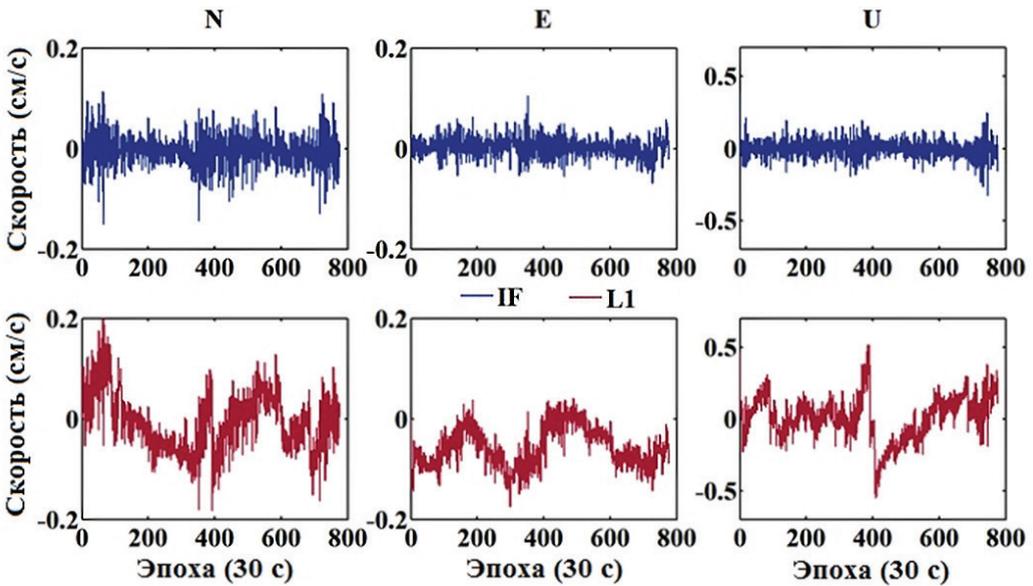


Рис. 5. Погрешности выработки составляющих скорости, полученные методом ДФН с использованием одночастотных L1-измерений и IF-комбинаций двухчастотных измерений при дискретности 30 с

Это означает, что при дискретности 1 с изменение ионосферной задержки несущественно и метод ДФН может быть реализован с применением бюджетного одночастотного приемника. По мере увеличения дискретности коррекция изменения ионосферной задержки становится все более актуальной, и в этом случае лучше использовать IF-комбинации. Следует отметить, что такого рода решения с большой дискретностью подходят только для случаев медленного движения, когда скорость можно считать постоянной между моментами поступления данных.

Анализ кинематических решений для подвижного объекта

Благодаря высокой точности позиционных решений с помощью ПО ИЕ в качестве эталона скорости в этом случае использовались производные от координат, вычисленных с применением ПО ИЕ. На рис. 6 представлены графики полученных таким образом эталонных составляющих скорости. Как видно из рисунка, объект находился попеременно в движении и неподвижном состоянии, совершая движение вперед и назад по дороге общей длиной около 900 м. Восточная и северная составляющие скорости равны приблизительно 4 и 6 м/с соответственно; вертикальная составляющая скорости незначительна.

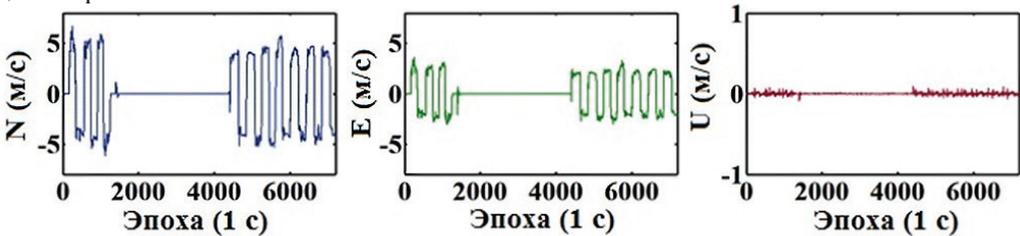


Рис. 6. Эталонные составляющие скорости, полученные с помощью ИЕ

На рис. 7 приведены графики разностей между составляющими скорости, полученными тремя исследуемыми методами, и соответствующими эталонными значениями. Из рис. 6 и 7 понятно, что во время остановок эти разности, т.е. погрешности определения скорости, невелики. При движении они существенно возрастают, причем на графиках наблюдаются относительно большие скачки в одинаковые моменты времени.

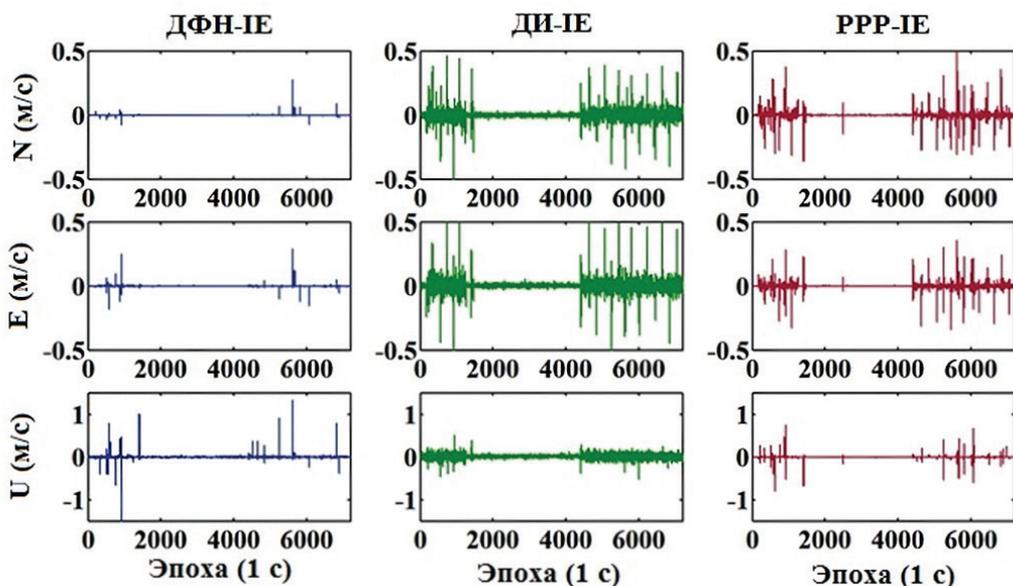


Рис. 7. Разности между составляющими скорости, полученными тремя методами, и соответствующими эталонными значениями

Чтобы выяснить причины этих скачков, на рис. 8 сравниваются графики погрешностей выработки составляющих скорости, полученных тремя методами, с их эталонными значениями. Для удобства сравнения графики погрешностей увеличены с соответствующей кратностью. Из рис. 8 следует, что погрешности резко увеличиваются во время поворотов объекта, причем для ДФН они имеют меньшую величину. Это объясняется тем, что эталонные составляющие скорости, полученные с помощью ПО IE, и результаты ДФН представляют собой среднюю скорость на интервале дискретности, тогда как результаты ДИ и PPP являются мгновенной скоростью. Когда объект совершает поворот и скорость быстро изменяется, средняя и мгновенная скорости существенно различаются. Это говорит о том, что точность определения скорости зависит от динамики объекта.

В табл. 5 представлены среднеквадратические значения разностей между составляющими скорости, полученными тремя методами, и эталонными значениями для всей реализации данных. В табл. 6 показаны среднеквадратические значения, которые отличаются от приведенных в табл. 5 тем, что они получены без учета интервалов, когда объект поворачивал. Видно, что точность после исключения поворотов повышается в некоторых случаях на 60%, что еще раз подтверждает зависимость точности оценивания скорости от динамики объекта.

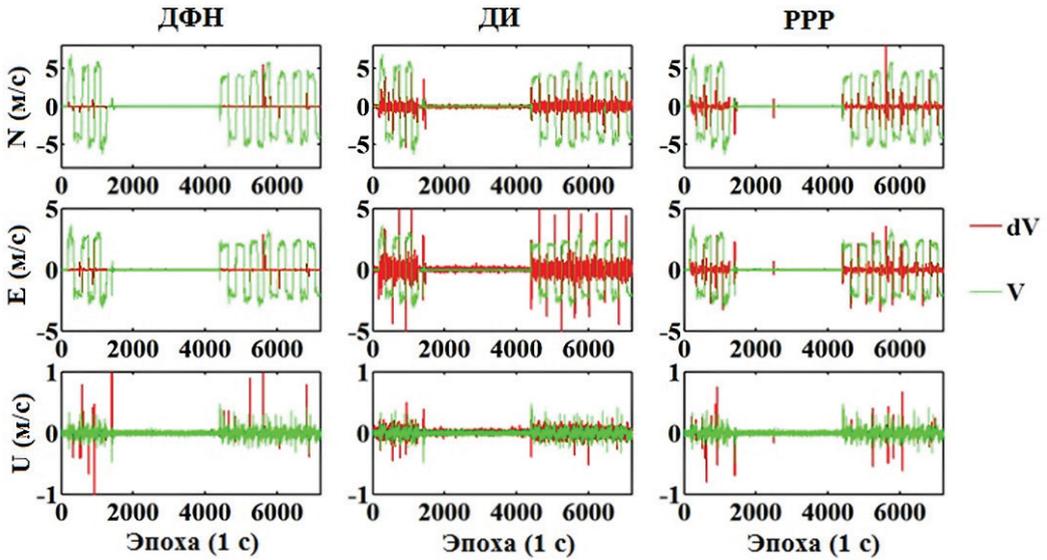


Рис. 8. Сопоставление разностей из рис. 6 с эталонными значениями

Таким образом, наиболее точным в эксперименте на подвижном основании оказывается ДФН, за ним следует РРР, а наихудшую точность дает ДИ. Скорость при использовании ДФН и скорость ИЕ являются средними скоростями на интервале дискретности, а в случае применения РРР и ДИ – мгновенными, поэтому значение скорости, полученное методом ДФН, лучше совпадает с эталонной скоростью ИЕ. Чтобы проиллюстрировать этот вывод, проведем сопоставление результатов применения ДИ и РРР. Перед тем как данные поворотов объекта были исключены, разница между результатами применения ДИ и РРР составляла 3,7, 5,1 и 5,8 см/с соответственно для составляющих N , E и U . После исключения данных поворота эти показатели составляли соответственно 3,2, 3,9 и 4,6 см/с. Это говорит о том, что результаты ДИ и РРР ближе друг к другу, чем результаты ДИ и эталонная скорость.

Таблица 5

Среднеквадратические значения разностей между составляющими скорости, полученными тремя методами, и эталонными значениями для всей реализации данных

Составляющие	N (см/с)	E (см/с)	U (см/с)
ДФН	1,0	0,7	4,0
ДИ	6,7	5,3	5,3
РРР	2,7	2,7	3,0

Приведенные выше результаты получены с использованием уточненных орбит и часов спутников, предоставленных IGS, которые можно применять только в камеральном режиме. При этом в некоторых приложениях необходимо получать точные значения скорости в режиме реального времени. В табл. 7 показаны среднеквадратические значения разностей между составляющими скорости, полученными

с помощью ДФН и ДИ, и эталонными значениями с использованием бортовых, т.е. транслируемых в навигационных сообщениях эфемерид и параметров спутниковых часов. При сравнении табл. 7 и 5 можно отметить, что точность выработки скорости при использовании ДИ и применении более грубых бортовых данных совсем не пострадала. Точность определения скорости с помощью ДФН несколько понизилась, но не существенно. Таким образом, ДФН и ДИ можно применять для точного определения скорости в режиме реального времени.

Т а б л и ц а 6

Среднеквадратические значения разностей между составляющими скорости, полученными тремя методами, и эталонными значениями без учета интервалов с поворотами

Составляющие	N (см/с)	E (см/с)	U (см/с)
ДФН	0,4	0,3	1,3
ДИ	4,0	3,5	4,6
PPP	2,0	1,7	2,5

Т а б л и ц а 7

Среднеквадратические значения разностей между составляющими скорости, полученными с помощью ДФН и ДИ, и эталонными значениями с учетом бортовых данных

Составляющие	N (см/с)	E (см/с)	U (см/с)
ДФН	1,4	0,9	3,3
ДИ	6,8	5,3	5,3

Выводы

Анализ эффективности трех описанных в работе методов определения скорости позволяет сделать следующие выводы.

1. При моделировании кинематических решений с использованием статических данных (эталонная скорость предполагалась равной нулю) среднеквадратические значения погрешностей выработки скорости по осям N , E и U составляли 0,05, 0,04, и 0,28 см/с для ДФН; 0,98, 0,75 и 2,06 см/с – для ДИ; 0,05, 0,04 и 0,16 см/с – для PPP. Наименьшая точность продемонстрирована ДИ. Точности ДФН и PPP примерно одинакова.

2. На подвижном основании среднеквадратические значения разностей между выработанными и эталонными значениями скорости, полученными с помощью ИЕ, по осям N , E и U составили 1,0, 0,7 и 4,0 см/с для ДФН; 6,7, 5,3 и 5,3 см/с – для ДИ; 2,7, 2,7 и 3,0 см/с – для PPP. Наилучшее совпадение с эталонной скоростью – у ДФН. Более грубым является PPP, а ДИ показал наихудшую точность.

3. Точность трех рассматриваемых методов зависит от динамики объекта. На поворотах точность существенно снижается.

4. При дискретности поступления данных 1 с метод ДФН с использованием однократных измерений обеспечивает почти такую же точность, как при использова-

нии ИГ-комбинаций двухчастотных измерений. Точность ДФН и ДИ несущественно снижается при замене точных эфемерид и часов спутников от IGS бортовыми данными спутников, что подтверждает возможность применения этих методов в режиме реального времени для мониторинга сейсмических и деформационных процессов.

Благодарность

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы Китайского национального фонда естественных наук (грант №41674034, 4197040339), а также программы Китайской академии наук «Сто лучших новаторов» (Pioneer Hundred Talents) (грант №Y923YC1701) и Ключевой программы исследований в области передовых наук (Key Research Program of Frontier Sciences) (грант №QYZDB-SSW-DQC028).

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang, W., Ghogho, M., and Aguado, L. E., GPS single point positioning and velocity computation from RINEX file under Matlab environment, *Proc. 13th IAIN World Congress, Stockholm, Sweden*, 2009.
2. Peng, Y.Q., Xu, C.D., and Li, Z., Application of MIEKF optimization algorithm in GPS positioning and velocity measurement, *Computer Simulation*, 2018, vol. 35, no. 7, pp. 65–69.
3. Yan, Y.W., Ye, S.R., and Xia, J.C., Research of BDS velocity estimation with time differenced carrier phase method, *Science of Surveying & Mapping*, 2016, vol. 41, no. 7.
4. Wang, F.H., Zhang, X.H., and Huang, J.S., Error analysis and accuracy assessment of GPS absolute velocity determination without SA, *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, vol. 11, no. 2, pp. 133–138.
5. Branzanti, M., Colosimo, G., and Mazzoni, A., Variometric approach for real-time GNSS navigation: first demonstration of kin-VADASE capabilities, *Advances in Space Research*, 2016, vol. 59, no. 11.
6. Sun, W., Duan, S.L., Ding, W., and Kong, Y., Comparative analysis on velocity determination by GPS single point, *Journal of Navigation & Positioning*, 2017, vol. 5, no. 1, pp. 81–85, 99.
7. Guo, A.Z., Wang, Y., Liu, G.Y., Zheng, H., and Zhang, M.S., Error analysis of high-rate GPS data real-time single-point velocity-determination, *Journal of Geodesy & Geodynamics*, 2013, vol. 33, no. 5.
8. Freda, P., Angrisano, A., Gaglione, S., and Troisi, S., Time-differenced carrier phases technique for precise GNSS velocity estimation, *GPS Solutions*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 335–341.
9. Ding, W.D., & Wang, J.L., Precise velocity estimation with a stand-alone GPS receiver, *The Journal of Navigation*, 2011, vol. 64, no. 2, p. 15.
10. Soon, B. K. H., Scheduling, S., Lee, H. K., Lee, H. K., and Durrant-Whyte, H., An approach to aid INS using time-differenced GPS carrier phase (ДФН) measurements, *GPS Solutions*, 2008, vol. 12, no. 4, pp. 261–271.
11. Han, S., and Wang, J., Integrated GPS/INS navigation system with dual-rate Kalman filter, *GPS Solutions*, 2012, vol. 16, no. 3, pp. 389–404.
12. Cheng, Y., Yu, X. W., Ye, C. Y., and Zhang, M., Analysis of single-point GPS velocity determination with Doppler, *GNSS World of China*, 2008, vol. 33, no. 1, pp. 31–34.
13. He, H.B., Yang, Y.X., Sun, Z.M., and Ma, X., Mathematic model and error analyses for velocity determination using GPS Doppler measurements, *Journal of Institute of Surveying and Mapping*, 2003, vol. 20, no. 2.
14. He, H.B., Yang, Y.X., and Sun, Z.M., A comparison of several approaches for velocity determination with GPS, *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, vol. 31, no. 3, pp. 217–221.
15. Wang, Q. X., and Xu, T. H., Combining GPS carrier phase and Doppler observations for precise velocity determination, *Science in China Series G (Physics, Mechanics and Astronomy)*, 2011, vol. 54, no. 6, pp. 1022–1028.
16. Tu, R., Fast determination of displacement by PPP velocity estimation, *Geophysical Journal International*, 2014, vol. 196, no. 3, pp. 1397–1401.
17. Graas, F. V., and Soloviev, A., Precise velocity estimation using a stand-alone GPS receiver, *Navigation*, 2004, vol. 51, no. 4, pp. 283–292.

18. **Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M.M., and Webb, F.H.**, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, vol. 102, no. B3, pp. 5005–5017.
 19. **Kouba, J., and Héroux, P.**, Precise point positioning using IGS orbit and clock products, *GPS Solutions*, 2001, vol. 5, no. 2, pp. 12–28.
 20. **Gao, Y., Lahaye, F., and Héroux, P.**, Modeling and estimation of C1–P1 bias in GPS receivers, *Journal of Geodesy*, 2001, vol. 74, no. 9, pp. 621–626.
 21. **Abdel-Salam, M.**, Precise point positioning using un-differenced code and carrier phase observations, PhD Thesis, the University of Calgary, Calgary, AB, Canada, 2005.
 22. **Kalman, R. E.**, A new approach to linear filtering and prediction problems, *Journal of Basic Engineering Transactions*, 1960, vol. 82, pp. 35–45.
 23. **Saastamoinen, J.**, Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites, *Proc. Int. Sympos. on the Use of Artificial Satellites for Geodesy*, 1971, 247–251.
-

Wang, X. (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, China; University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China), **Tu, R.** (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences; Key Laboratory of Precision Navigation and Timing, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, China; University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China), **Han, J., Zhang, R., Fan, L.** (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences; Key Laboratory of Precision Navigation and Timing, Chinese Academy of Sciences)

Comparison of GPS Velocity Obtained Using Three Different Estimation Models, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 2 (109), pp. 54–69.

Abstract. This study analyses the GPS velocity estimation performances of three different estimation models, namely, the time-differenced carrier phase velocity estimation (TDCPVE), Doppler observation velocity estimation (DopplerVE), and precise point positioning velocity estimation (PPPVE). Static and vehicle kinematic experiments are conducted for validation. Under simulated kinematic conditions using static data, the accuracy of the DopplerVE is the worst, and the precision of the velocity by the PPPVE is the same as with the TDCPVE. Under kinematic conditions, the accuracies of the three methods are related to the motion state of the mobile carrier (such as its acceleration and turning). When the sampling interval is 1 s, the TDCPVE can obtain precise velocity using a single-frequency stand-alone GPS receiver; the TDCPVE and DopplerVE can obtain accuracies of the same order of magnitude with broadcast and precise ephemerides, and can be used for real-time velocity measurement; the PPPVE can obtain not only an accurate position, but also an accurate velocity.

Key words: velocity estimation, carrier phase, Doppler observation, precise point positioning.

Материал поступил 23.10.2019