

ВАН СИНСИН, ШЭН ЧУАНЬЧЖЭНЬ, ЮЙ БАОГО, ЧЖАН ЦЗЫТЭН,
ЧЖАН ЦЗИНКУЙ, И ЦИН-У

СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ СХОДИМОСТИ PPP-РЕШЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОГРАНИЧЕНИЙ НА СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

В сложных условиях навигации, например в городе и в геологически опасных районах, может происходить блокировка сигналов ГНСС, а длительный период сходимости решения навигационной задачи способен значительно ограничивать применение динамического высокоточного абсолютного позиционирования (precise point positioning – PPP) в режиме реального времени. С учетом того что в течение периодов сходимости скорость определяется точнее, чем местоположение, мы предлагаем метод быстрого определения местоположения в реальном времени за счет учета различного рода ограничений по скорости в динамическом PPP-позиционировании. В зависимости от состояний и условий движения адаптивно используются различные данные о скорости. Например, модель с нулевой доплеровской скоростью применяется в неподвижном положении, измерения доплеровской скорости – при временной блокировке большинства видимых спутников, данные от других датчиков – при частой блокировке спутникового сигнала. Поскольку неточная динамическая модель способна влиять на результаты динамического позиционирования, ограничение по скорости может постепенно ослабляться при возобновлении приема сигналов ГНСС и постепенного сокращения неопределенности. Результаты статических и кинематических экспериментов демонстрируют, что при значительном снижении количества видимых спутников из-за блокировки сигналов применение нового метода определения местоположения может оперативно ускорить сходимость решения навигационной задачи при PPP-позиционировании, обеспечить высокую точность и непрерывность динамического позиционирования в реальном времени.

Ключевые слова: сходимость решения, динамическое PPP-позиционирование, ограничения по скорости, режим реального времени, блокировка сигналов.

Ван Синсин. Магистр, Главная государственная лаборатория по спутниковым навигационным системам и оборудованию (Шицзячуан, Китай); 54-й Научно-исследовательский институт Корпорации электронных технологий (Шицзячуан, Китай). ORCID 0000-0001-5459-536X.

Шэн Чуаньчжэнь. Доктор технических наук, Главная государственная лаборатория по спутниковым навигационным системам и оборудованию; 54-й Научно-исследовательский институт Корпорации электронных технологий.

Юй Баого. Доктор технических наук, Главная государственная лаборатория по спутниковым навигационным системам и оборудованию; 54-й Научно-исследовательский институт Корпорации электронных технологий. ORCID 0000-0002-7274-3888.

Чжан Цзытэн. Магистр, Главная государственная лаборатория по спутниковым навигационным системам и оборудованию; 54-й Научно-исследовательский институт Корпорации электронных технологий

Чжан Цзинкуй. Магистр, Главная государственная лаборатория по спутниковым навигационным системам и оборудованию; 54-й Научно-исследовательский институт Корпорации электронных технологий.

И Цин-У. Магистр, Главная государственная лаборатория по спутниковым навигационным системам и оборудованию; 54-й Научно-исследовательский институт Корпорации электронных технологий.

Научный редактор перевода к.ф.-м.н. Ю.В. Ясюкевич.

1. Введение

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) могут обеспечить высокоточное позиционирование на открытой местности, где возможно беспрепятственное прохождение сигналов [1]. При этом задействуются постоянно отслеживаемые сигналы, и для достижения необходимой точности PPP-позиционирования, использующего корректирующую эфемеридно-временную информацию, требуется значительное время. Тем не менее в городских условиях – при наличии множества высоких зданий, туннелей, виадуков, деревьев и т.д. – сигналы ГНСС могут блокироваться, и измерение радионавигационных параметров осуществляется с перерывами [2]. Потеря сигналов ГНСС приводит к резкому росту погрешности позиционирования и увеличению времени сходимости решения, что влияет на точность и доступность услуг ГНСС в течение этого периода.

При стандартном кинематическом PPP-позиционировании для оценки и обработки данных обычно используются четыре типа параметров: местоположение, смещение часов приемника, влажная составляющая тропосферной зенитной задержки (*zenith wet delay* – *ZWD*) и смещение фазы несущей. При этом необходимость повторного перезапуска решения, занимающего десятки минут, вызвана в основном пропусками данных [3]. Учеными было разработано множество методов для повышения точности позиционирования и сокращения времени сходимости решения навигационной задачи при прерывании сигнала. Так, в [4] предложен метод мгновенного выявления срыва слежения за фазой (проскальзывание цикла) с использованием безразностных измерений фазы несущей для реинициализации PPP-позиционирования в реальном времени. Метод на основе разностного решения [5] позволяет оценивать размер проскальзываний цикла методом наименьших квадратов, чтобы мгновенно снизить эффект от прерываний сигнала. В статье [6] представлена математическая модель, которая комбинирует данные о псевдодальности, фазе, доплеровских наблюдениях и расчетные ионосферные вариации и фиксирует параметры проскальзывания цикла как целые числа для мгновенной реинициализации при кинематическом PPP-позиционировании в реальном времени. Метод, описанный в [7], позволяет точно прогнозировать ионосферные задержки, чтобы значительно ускорить разрешение целочисленной неопределенности. В [8] была выполнена коррекция ионосферной погрешности высшего порядка для ускорения сходимости PPP-позиционирования. В [9] для ускорения сходимости PPP-позиционирования авторы использовали тропосферную задержку, обладающую кратковременной стабильностью, до прерывания спутниковых сигналов, в [10] – региональные данные. В [11] предложена модель для быстрого определения местоположения в реальном времени путем введения в безразностное и некомбинированное PPP-позиционирование ограничений по региональным межспутниковым первым ионосферным разностям. Метод, предложенный в работе [12], предусматривает моделирование тропосферных задержек региональных сетей для повышения точности и ускорения сходимости PPP-позиционирования. В [3] анализируется метод, предполагающий применение частичных параметров, рассчитанных по местоположению и влажной составляющей тропосферной зенитной задержки в качестве первичного ограничения, чтобы инициализировать фильтр Калмана для обеспечения мгновенной сходимости решения навигационной задачи PPP.

В упомянутых выше работах исследуется мгновенная сходимость решения PPP-позиционирования за счет ограничения атмосферных задержек или корректировки про-

скальзываний цикла. Кроме того, некоторые ученые пытались использовать данные о скорости для восстановления информации о проскальзывании. В работе [13] представлен метод динамического PPP-позиционирования с оцениванием скорости (PPP velocity estimation model – PPPVE) для его определения. Испытания показали, что этот метод обеспечивает определение смещения с погрешностью 1-2 см и время сходимости решения составляет около 1 мин. В статье [14] описывается кинематический эксперимент с использованием подвижного объекта, результаты которого продемонстрировали пригодность мультисистемного метода PPPVE для кинематических приложений. Показано, что его точность повышается при использовании нескольких ГНСС, а сходимость решения будет недолгой в сравнении с обычным кинематическим PPP.

Для подвижного объекта, с учетом того что в период сходимости решения точность оценки скорости выше точности оценки местоположения, мы предлагаем метод быстрого динамического PPP-позиционирования в реальном времени с дополнительными данными, позволяющими использовать ограничения на возможную скорость потребителя. Оценка местоположения, рассчитанная с учетом ограничения по скорости, после восстановления приема сигнала ГНСС может быть использована для сокращения времени сходимости PPP-решения. В зависимости от состояний и условий движения адаптивно применяются различные ограничения по скорости. Например, жесткое ограничение по нулевой скорости вводится при неподвижном положении, измерения доплеровской скорости задействуются при временной блокировке большинства видимых спутников, показания скорости от других автономных датчиков – при частой блокировке спутникового сигнала. Поскольку неточная динамическая модель потребителя может повлиять на результаты динамического позиционирования, роль ограничений и данных о скорости может постепенно снижаться при возобновлении приема сигналов ГНСС по мере сходимости процедуры разрешения неоднозначности.

2. Методы

2.1. PPP-позиционирование с оцениванием скорости (PPPVE)

При PPP-позиционировании точные данные об орбитах спутников и данные бортовых часов, предоставленные организациями, например Международной службой ГНСС (International GNSS Service – IGS), используются для обработки псевдодалейностей и фаз несущей с целью определения местоположения приемника [15, 16]. Наиболее распространены такие модели PPP-позиционирования, как безразностная и разностная, а также модель Университета Калгари [17, 18]. В безразностной модели применяются двухчастотные безионосферные комбинации псевдодалейностей и фазы несущих для GPS [19]:

$$\Phi_{r,IF}^s = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 \Phi_{r,1}^s - f_2^2 \Phi_{r,2}^s) = \rho_r^s - (\delta t_r - \delta t^s) c - \lambda N^s + \delta_{trop}^s + \varepsilon_{\phi}^s, \quad (1)$$

$$P_{r,IF}^s = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 P_{r,1}^s - f_2^2 P_{r,2}^s) = \rho_r^s - (\delta t_r - \delta t^s) c + \delta_{trop}^s + \varepsilon_p^s, \quad (2)$$

где верхний индекс s обозначает спутник GPS; нижний индекс r – приемник; $P_{r,IF}^s$ – безионосферное наблюдение псевдодалейности; $\Phi_{r,IF}^s$ – безионосферное наблюдение фазы несущей; f – частота; нижние индексы 1 и 2 – номера частот; ρ_r^s – геометрическое расстояние от спутника до приемника; δt_r и δt^s – смещения часов приемника и спутника

относительно системного времени; c – скорость света; λ – длина волны несущей; N^s – неопределенность фазы несущей; δ_{trop}^s – тропосферные задержки; ϵ_{φ}^s и ϵ_p^s – шумы измерений фазы несущей и псевдодалности. Другие погрешности: смещения и вариации фазовых центров антенн, приливные погрешности, эффект поляризации фазы (phase wind-up), вращение Земли и релятивистский эффект – подвергаются коррекции в существующих моделях и не рассматриваются в настоящем исследовании.

Уравнения наблюдений PPPVE на эпохе k можно компактно изложить в следующем виде:

$$L_k = A_k X_k + V_k, V_k \sim N(0, R_k), \quad (3)$$

где L – вектор наблюдений для n спутников; A – матрица коэффициентов; X – вектор неизвестных параметров; V – шум измерений; k – эпоха; R – ковариационная матрица; $\sim N$ – нормальное распределение. Следует отметить, что член δt^s , входящий в (1), (2), отсутствует в (3), так как предполагается, что он скорректирован прецизионной поправкой к бортовым часам.

Элементы уравнения (3) для одного спутника можно описать так:

$$A = \begin{bmatrix} e & 0 & 0 & m_{wz} & -1 & \lambda \\ e & 0 & 0 & m_{wz} & -1 & 0 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} \delta_{\varphi}^2 & \\ & \delta_p^2 \end{bmatrix}, X = [s \quad v \quad a \quad T_{wet} \quad \delta t_r \quad N_{IF}]^T, \quad (4)$$

где e – единичный вектор от спутника к приемнику; m_{wz} – картирующая тропосферная функция; s , v и a – векторы смещения, скорости и ускорения приемника; T_{wet} , δt_r , N_{IF} – влажная составляющая тропосферной зенитной задержки, смещение часов приемника и неоднозначность фазы несущей; δ_{φ}^2 и δ_p^2 – дисперсии шумов измерений фазы несущей и псевдодалности.

Уравнение состояния можно записать как

$$X_k = F_k X_{k-1} + W_k, W_k \sim N(0, Q_w). \quad (5)$$

Динамика состояния моделируется гауссово-марковским процессом второго порядка, соответствующим допущению о случайном изменении положения, скорости или ускорения. Влажная составляющая тропосферной зенитной задержки представлена случайным блужданием, смещение часов приемника – белым шумом, а неоднозначность фазы представляет собой постоянную величину. Таким образом, переходная матрица состояния и шум процесса описываются как

$$F_k = \begin{bmatrix} E & \tau E & 0.5\tau^2 E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & \tau E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, Q_w = \tau \begin{bmatrix} \frac{\tau^4}{20} E q_a^2 & \frac{\tau^3}{8} E q_a^2 & \frac{\tau^2}{6} E q_a^2 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\tau^3}{8} E q_a^2 & \frac{\tau^2}{3} E q_a^2 & \frac{\tau^1}{2} E q_a^2 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\tau^2}{6} E q_a^2 & \frac{\tau^1}{2} E q_a^2 & E q_a^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_z^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_t^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где τ – частота дискретизации в секундах, 1~3 с, при повышении этого значения будет расти и погрешность модели; E – единичная 3×3 -матрица; q_a , q_z и q_t – спектральные плотности мощности порождающих шумов ускорения, тропосферной задержки и погрешности часов приемника. Типовые значения: q_a – несколько $\text{см} \times \text{сек}^{-5/2}$, q_z – 2-5 $\text{мм} \times \text{ч}^{-1/2}$, q_t описывается белым шумом с интенсивностью $100 \text{ м} \times \text{с}^{-1/2}$.

Поскольку (3) – это уравнение наблюдения, а (5) – уравнение состояния, информацию о скорости на основе ГНСС-измерений легко получить с использованием фильтра Калмана [20]. Ниже приведена схема расчета.

Прогноз состояния:

$$\hat{X}_{k/k-1} = F_k \hat{X}_{k-1}, \quad (7)$$

$$P_{k/k-1} = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_W. \quad (8)$$

Коррекция состояния:

$$K_k = P_{k/k-1} A_k^T [A_k P_{k/k-1} A_k^T + R_k]^{-1}, \quad (9)$$

$$\hat{X}_{k/k} = \hat{X}_{k/k-1} + K_k (L_k - A_k \hat{X}_{k/k-1}), \quad (10)$$

$$P_k = [I - K_k A_k] P_{k/k-1}, \quad (11)$$

где $\hat{X}_{k/k-1}$ – оценка вектора состояния; $P_{k/k-1}$ – ковариация погрешности оценки; K_k – коэффициент усиления фильтра Калмана; R_k – ковариация шума измерений.

2.2. Модель с ограничением по нулевой скорости

Когда объект, например припаркованная машина, неподвижен, местоположение, рассчитанное методом спутникового позиционирования, одинаково до и после эпохи, т.е. скорость является нулевой. Тем не менее вследствие погрешностей, таких как шум наблюдения, происходит дрейф определения местоположения и скорости, рассчитанных для объекта, особенно при низком качестве сигнала наблюдения, и погрешность вычисления координат будет расти. В связи с этим, когда объект считается неподвижным, при калмановской фильтрации используются измерения нулевой скорости. Это позволяет повысить точность позиционирования.

Задаются следующие уравнения измерений:

$$0 = E v + V_v, \quad (12)$$

$$0 = E a + V_a. \quad (13)$$

Дисперсия задается на уровне $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}^{-2}$ или $\text{м}^2/\text{с}^{-4}$. Вообще-то нелогично использовать (13) при наличии (12).

2.3. Модель с измерениями доплеровской скорости

Помимо измерений псевдодальности и фазы, некоторые приемники измеряют также доплеровский сдвиг частоты. Доплеровские измерения скорости точнее и могут применяться как ограничение для корректировки расчетных данных.

Существуют два режима введения результатов измерения доплеровской скорости в динамическую PPP-модель [21]. В первом доплеровские (или выведенные на основе доплеровских) измерения используются напрямую совместно с измерениями псевдодальности и фазы. Во втором режиме формируется уравнение динамики потребителя по измеренной доплеровской скорости. В этом случае требуется достаточное количество спутников для расчета всех трех составляющих скорости.

Величина измеренного доплеровского сдвига частоты является мгновенным наблюдаемым значением скорости изменения фазы несущей. Дифференцируя уравнение (1), получаем уравнение оценки доплеровской скорости:

$$\lambda D^s_{(ii)} = \dot{\rho}_{r(ii)} - (\dot{\delta t}_r - \dot{\delta t}^s)_{(ii)} c, \quad (14)$$

где D^s – доплеровский сдвиг частоты. Далее значение длины волны несущей λ , если не указано иное, соответствует частоте L1. Остальные погрешности игнорируются.

После добавления измерений доплеровской скорости получаем:

$$A = \begin{bmatrix} e & 0 & 0 & m_{wz} & -1 & 0 & \lambda \\ e & 0 & 0 & m_{wz} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & e & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} \delta_\varphi^2 & & \\ & \delta_p^2 & \\ & & \delta_D^2 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$X = \begin{bmatrix} s & v & a & T_{wet} & \delta t_r & \delta t_r & N_{IF} \end{bmatrix}^T$$

$$F_k = \begin{bmatrix} E & \tau E & 0.5\tau^2 E & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & \tau E & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, Q_w = \tau \begin{bmatrix} \frac{\tau^4}{20} E q_a^2 & \frac{\tau^3}{8} E q_a^2 & \frac{\tau^2}{6} E q_a^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\tau^3}{8} E q_a^2 & \frac{\tau^2}{3} E q_a^2 & \frac{\tau^1}{2} E q_a^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\tau^2}{6} E q_a^2 & \frac{\tau^1}{2} E q_a^2 & E q_a^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_z^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_t^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_t^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

2.4. Модель с показаниями скорости от других датчиков

При неточной динамической модели или резком изменении состояния движения во время маневра объекта точность прогноза состояния на основе фильтра Калмана резко падает. На объекте могут также использоваться другие датчики – спидометры, акселерометры и т.д., чьи внешние данные не зависят от условий наблюдения ГНСС и очень чувствительны к возмущениям состояния. Можно использовать эти данные как соответствующее ограничение по скорости для их комбинирования с данными

динамического PPP-позиционирования, что позволит значительно повысить надежность последнего.

Взяв в качестве примера показания инерциального модуля интегрированного приемника INSD, зададим уравнения дополнительных измерений:

$$INSDV = Ev + V, \quad (17)$$

$$INSDA = Ea + V. \quad (18)$$

Дисперсия задается на уровне $10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}^{-2}$ или $\text{м}^2/\text{с}^{-4}$.

Если спутник полностью заслонен и наблюдения недоступны, напрямую интегрируя скорость, можем получить смещение и использовать его для ограничения области возможного местоположения:

$$s' = s_0 + ds = s_0 + \sum_{i=k_0}^{i=k} v_i \tau + \frac{1}{2} a_i \tau^2, \quad (19)$$

где ds – интегрированное смещение, s' – расчетное положение, k_0 – начальная эпоха, когда произошла потеря сигнала, v_i – показания скорости, τ – их дискретность.

2.5. Выбор типа ограничения скорости

Описанные выше ограничения по скорости применимы в разных ситуациях.

1. При моделировании кинематических условий используется сниженный шум ускорения и добавляется ограничение по нулевой скорости.

Когда объект неподвижен, местоположение, рассчитанное с помощью метода спутникового позиционирования, одинаково до и после эпохи, т.е. скорость является нулевой. Ввиду этого, когда объект считается неподвижным, в фильтре Калмана применяются измерения, передающие факт нулевой скорости.

В эксперименте, описанном в данной статье, при статических условиях q_a задавалось на уровне 0,001. При неподвижном объекте точность PPPVE выше, чем точность оценивания доплеровской скорости [22], поэтому вес доплеровской скорости должен быть снижен.

2. При кинематических условиях и временной блокировке большинства видимых спутников применяется модель с измерениями доплеровской скорости.

В процессе фильтрации, когда пространство наблюдения открыто и количество спутников достаточно, использовать дополнительную информацию о скорости нет необходимости. При прерывании большинства сигналов и недостаточном количестве видимых спутников применение внешних ограничений по доплеровской скорости ускоряет реинициализацию PPP-позиционирования.

3. При кинематических условиях и частой блокировке спутникового сигнала применяется модель с показаниями скорости от других датчиков.

При непрерывной блокировке сигнала наблюдения являются недостаточными, и в качестве дополнительного источника информации используется внешняя скорость от инерциального модуля интегрированного устройства INSD-E1.

С учетом вышеприведенного анализа схема обработки данных в динамическом PPP-позиционировании с дополнительной информацией о скорости, предложенной в этой статье, приведена на рис. 1.

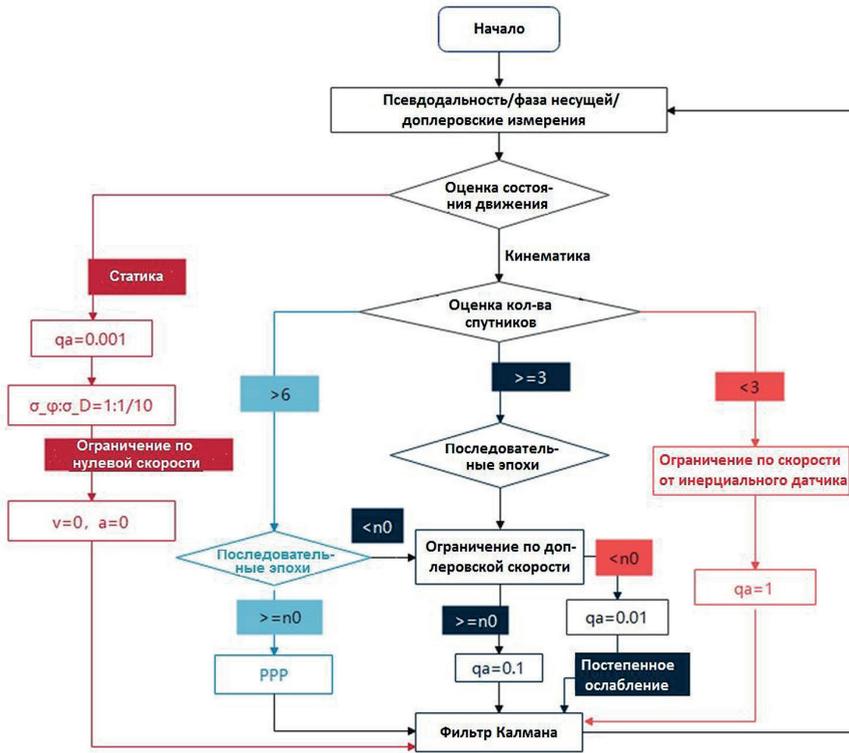


Рис. 1. Схема PPP-позиционирования с дополнительной информацией о скорости

3. Испытания метода по данным GPS

3.1. Оценка эффективности метода при моделировании кинематических условий

Самый очевидный метод анализа и проверки влияния информации о скорости на качество динамического PPP-позиционирования – это моделирование решения с использованием статических данных с точными данными скорости и ускорения. Экспериментальные данные с интервалом дискретизации 1 с были получены от станции DHSY (базовая станция) 25 марта 2018 г. Каждые 5000 эпох имитировалось сокращение рабочего созвездия спутников до трех, что недостаточно для навигационного решения по одномоментным измерениям.

В соответствии с различными методами применения ограничений по скорости предлагаются три схемы:

- 1) информация о скорости не привлекается;
- 2) используются измерения доплеровской скорости;
- 3) скорость и ускорение считаются нулевыми.

На рис. 2 демонстрируется количество спутников и геометрический фактор (PDOP). На рис. 3 показаны погрешности оценки местоположения при использовании этих трех схем: восточная, северная, вертикальная составляющая погрешности определения местоположения и модуль вектора погрешности позиционирования. Желтая линия показывает PPP-решение с полным набором спутников.

Из рис. 2 видно, что на эпохах 5000–5010, 10000–10010, 15000–15010 и 20000–20010 наблюдаемы всего три спутника, а пространственное распределение неудачное, о чем говорит значение PDOP на уровне 15–20. Из рис. 3 понятно, что в этот период точность позиционирования по схеме 1 резко снижается, особенно это касается высоты. По динамике модуля вектора погрешности позиционирования очевидно, что для восстановления точности требуется более 10 мин. Это вызвано тем, что оценка параметров состояния в основном зависит от ограниченных наблюдаемых данных и ограничения динамических моделей задействованы не в полной мере.

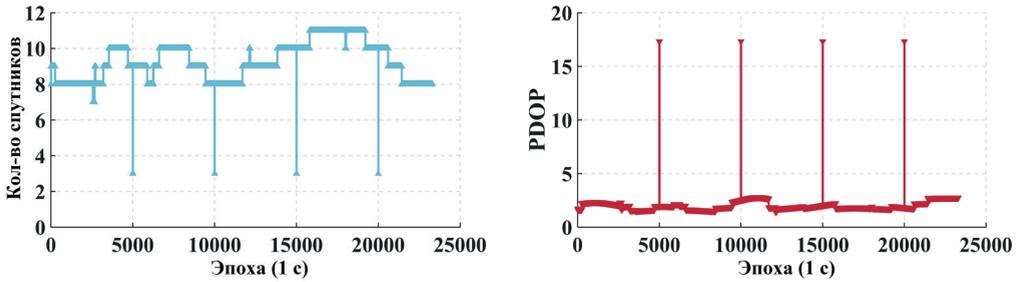


Рис. 2. Количество спутников и геометрический фактор (PDOP)

Результаты позиционирования по схемам 2 и 3 на рис. 3 показывают, что при введении измерений доплеровской или нулевой скорости погрешности определения местоположения снижаются. При этом в схеме 3 погрешность определения координат всегда стабильна, погрешность в горизонтальной плоскости не превышает нескольких сантиметров, а по высоте – нескольких десятков сантиметров. Это говорит о том, что алгоритм сходимости с привлечением данных о скорости эффективен.

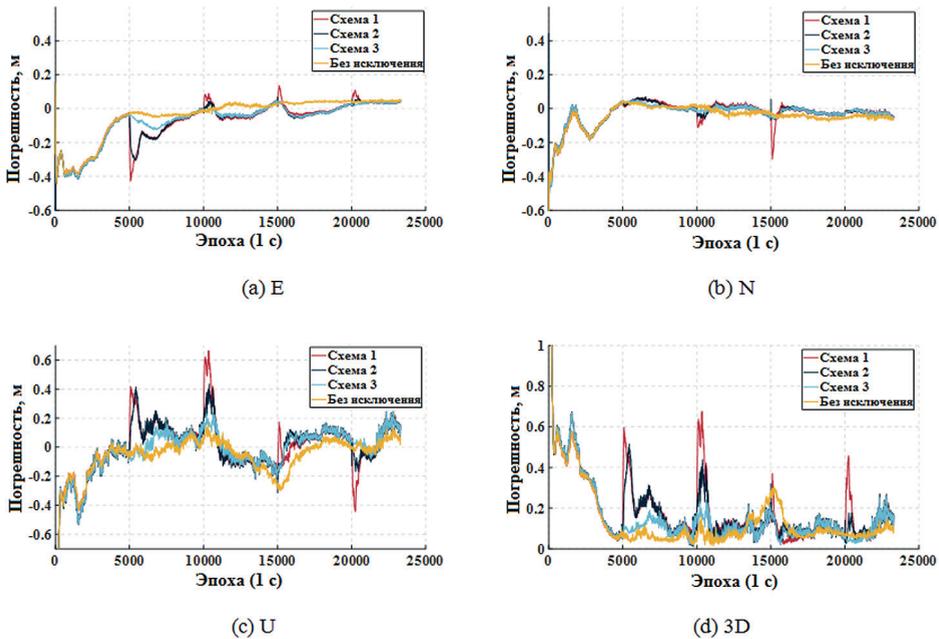


Рис. 3. Погрешности позиционирования в трех схемах

Максимальные значения компонент погрешности позиционирования в восточном, северном и вертикальном направлениях и полная 3D-погрешность во время процедуры сходимости решения приведены в табл. 1. Самые низкие погрешности наблюдались при использовании схемы 3. Это связано с тем, что в статических условиях реальное значение скорости равно нулю, реальное ограничение по скорости дается по схеме 3, а скорость по схеме 2 имеет систематическую погрешность. Таким образом, можно сделать вывод, что, чем точнее данные о скорости, тем сильнее их влияние на сходимость и меньше погрешности позиционирования.

Таблица 1

Максимальные погрешности позиционирования

		Максимальная погрешность (м)			
Восточная	Схема 1	0,43	0,08	0,14	0,10
	Схема 2	0,30	0,04	0,06	0,05
	Схема 3	0,12	0,03	0,04	0,03
Северная	Схема 1	0,07	0,10	0,29	0,05
	Схема 2	0,07	0,05	0,06	0,04
	Схема 3	0,04	0,02	0,05	0,04
Вертикальная	Схема 1	0,41	0,66	0,16	0,44
	Схема 2	0,41	0,44	0,31	0,16
	Схема 3	0,14	0,23	0,14	0,08
3D	Схема 1	0,59	0,67	0,37	0,45
	Схема 2	0,51	0,43	0,31	0,17
	Схема 3	0,19	0,22	0,21	0,05

3.2. Оценка эффективности метода при кинематических условиях

В разделе 3.1 в ходе испытаний моделировалось динамическое решение с использованием статических данных. В данном разделе описываются две серии кинематических экспериментов на борту подвижного объекта.

Бортовой кинематический эксперимент №1 проводился вблизи Китайского музея авиации в г. Пекине 30 марта 2018 г. в период с 10:00 до 12:00 с интервалом дискретизации 1 с. На рис. 4 показана траектория движения объекта: видно, что объект двигался туда и обратно по участку дороги длиной 900 м. Чтобы обеспечить сходимость начального решения, сначала выполняется обратная фильтрация данных, а затем прямая. Для наглядности спутники с определенными углами возвышения были искусственно исключены, чтобы имитировать их недостаточное количество вследствие блокировки сигнала. В предыдущей симу-



Рис. 4. Траектория движения объекта

ляции воспроизводились четыре блокировки спутниковых сигналов и сокращение количества спутников ниже минимального порога – менее 4 (до 3). Тем не менее длительность бортового кинематического эксперимента составила всего 2 часа, поэтому была симитирована только одна блокировка сигналов спутников. Количество спутников и соответствующий геометрический фактор (PDOP) приведены на рис. 5.

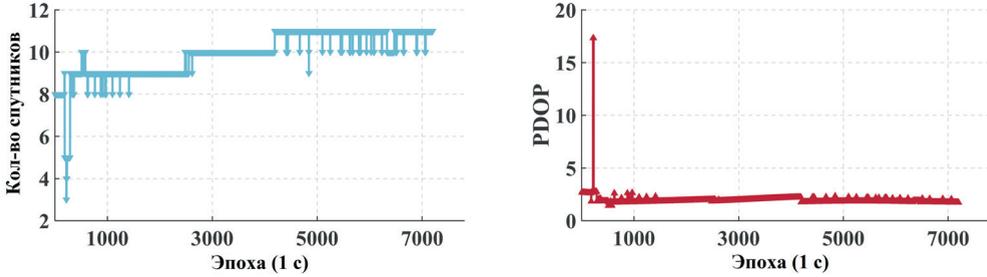


Рис. 5. Количество спутников и геометрический фактор (PDOP)

В соответствии с различными методами применения данных о скорости предлагаются три схемы:

- 1) данные о скорости не применяются;
- 2) выполняется оценивание скорости методом PPPVE, скорость и ускорение описываются случайным блужданием;
- 3) применяются измерения доплеровской скорости, скорость и ускорение определяются методом PPPVE с привлечением доплеровских измерений.

Результаты позиционирования без исключения спутников используются в качестве эталонных данных. На рис. 6, а, б, в представлены погрешности трех схем по трем географическим осям. Время сходимости и максимальные погрешности позиционирования приведены в табл. 2. Указаны время, за которое погрешность позиционирования выходит на уровень 0,1 м, и максимальная погрешность определения положения за время сходимости. Более наглядная гистограмма показана на рис. 7.

Т а б л и ц а 2

Время сходимости и максимальные погрешности позиционирования

	Восточное направление			Северное направление			Вертикальное направление		
	Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 1	Схема 2	Схема 3	Схема 1	Схема 2	Схема 3
Время (мин)	7,9	3,1	3,0	6,9	3,2	2,5	48,8	11,4	10,9
Максимальная погрешность (м)	0,24	0,22	0,15	0,18	0,17	0,11	1,65	1,74	1,07

Из рис. 5 видно, что на эпохе 217–221 наблюдаемы всего три спутника, а пространственно-геометрическое распределение очень неудачное, что приводит к большой величине PDOP – 15-20. В течение этого периода точность позиционирования во всех трех схемах значительно снизилась. После эпохи 288 количество спутников выросло до 9. Вследствие пропадания сигнала на 5 с и отсутствия достаточного количества спутников в течение более чем 1 мин разрешение неоднозначности было

начато снова после появления спутниковых сигналов, что можно видеть по постепенному снижению погрешности позиционирования.

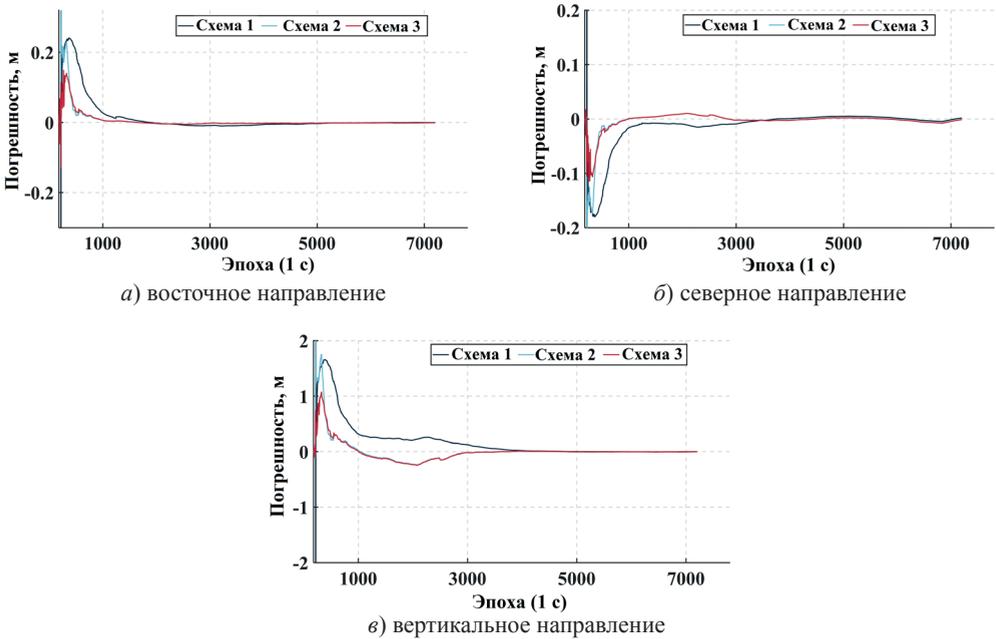


Рис. 6. Погрешности позиционирования вдоль географических осей

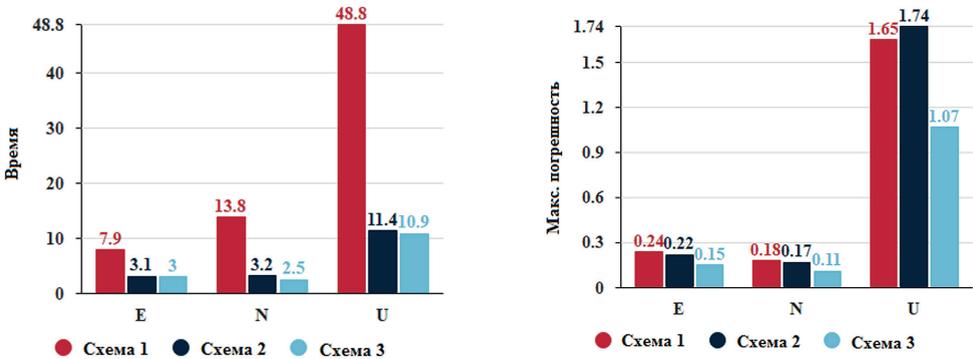


Рис. 7. Время сходимости и максимальные погрешности местоположения

Из рис. 6 следует, что при ограничении по скорости PPPVE время сходимости в схеме 2 значительно сокращается. Согласно табл. 2, горизонтальная погрешность позиционирования в схеме 2 сходится к 0,1 м за 3,1-3,2 мин, а в схеме 1 – за 6,9-7,9 мин. Вертикальная погрешность определения местоположения в схеме 2 сходится к 0,1 м за 11,4 мин, в то время как в схеме 1 для этого потребуется 48,8 мин. Это связано с тем, что метод PPPVE позволяет получить высокоточные данные о скорости, причем нет необходимости ожидать сходимости решения задачи оценки неоднозначностей, а применение ограничений по скорости ускоряет реинициализацию PPP-позиционирования.

В то же время выяснилось, что, хотя схема 2 значительно ускоряет сходимость, пиковое значение погрешности не уменьшается. В схеме 3 оно значительно снижено. Данное явление объясняется тем, что при наличии только трех спутников возникает рассогласование между скоростью, измеренной PPPVE, и реальной скоростью из-за недостатка данных наблюдения. При применении ограничения по доплеровской скорости в схеме 3 значительно улучшается точность измерения скорости, а значит, снижается пиковое значение погрешности.

По результатам численного анализа в сравнении со схемой 1 время сходимости в схеме 3 сокращается на 62,0%, 63,7% и 77,7% для восточного, северного и вертикального направлений, а максимальные погрешности позиционирования в этих направлениях снижаются на 37,5%, 38,9% и 35,1%. Таким образом, мы приходим к тем же выводам, которые были сделаны и в ходе статического испытания: чем точнее ограничение по скорости, тем очевиднее его влияние на результат позиционирования.

Бортовой кинематический эксперимент №2 проводился в 06:59~08:17 14 января 2022 г., его продолжительность составила 1 ч 18 мин, интервал дискретизации – 1 с. Сначала объект стоял неподвижно, ожидая сходимости данных, а затем поехал в жилую зону с большим количеством деревьев. Траектория движения объекта показана на рис. 8 (RTK-решение).



Рис. 8. Траектория движения, полученная на основе RTK-решения

Количество спутников и геометрический фактор PDOP приведены на рис. 9. Видно, что вследствие блокировки сигналов имеется недостаток наблюдений, что приводит к прерывистым результатам RTK-позиционирования. Здесь также предлагаются три схемы в зависимости от типа ограничений по скорости:

- 1) данные о скорости не применяются;
- 2) применяются измерения доплеровской скорости, скорость и ускорение определяются методом PPPVE с привлечением доплеровских измерений;
- 3) применяется данные о скорости от других датчиков, скорость и ускорение определяются методом PPPVE с привлечением показаний скорости от инерциального модуля, интегрированного в INSD-E1.

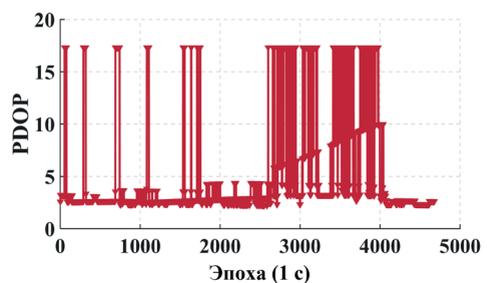
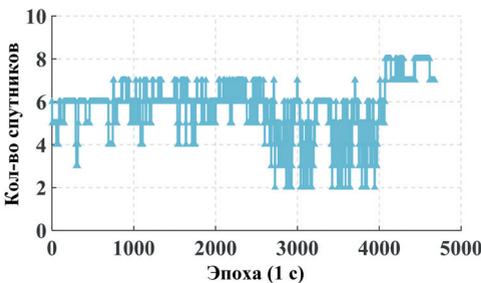


Рис. 9. Количество спутников и геометрический фактор PDOP

Бортовой эксперимент №1 проводился на открытом пространстве, поэтому некоторые спутники были исключены для имитации блокировки, а точность позиционирования при блокировке сравнивалась с эталонной без исключения спутников. В эксперименте №2 видимость спутников была ограничена, поэтому точность позиционирования оценивалась по результирующей траектории. На рис. 10, а, б, в показаны траектории определения местоположения для схем 1, 2 и 3. Из рис. 10, а видно, что результаты позиционирования на участке дороги, где произошло прерывание спутникового сигнала, значительно ухудшены. Это связано с более высокой погрешностью позиционирования в течение периода сходимости решения после появления сигналов. В схеме 2 используется ограниченное количество наблюдений, а скорость и ускорение определяются по методу PPPVE с доплеровскими измерениями, чтобы сократить область априорной неопределенности местоположения. Общий результат позиционирования получается более гладким, чем в схеме 1, что видно по участкам 1, 2 и 6 на рис. 10, а, и количество эпох, на которых возникает это рассогласование на участке 4, также уменьшено.

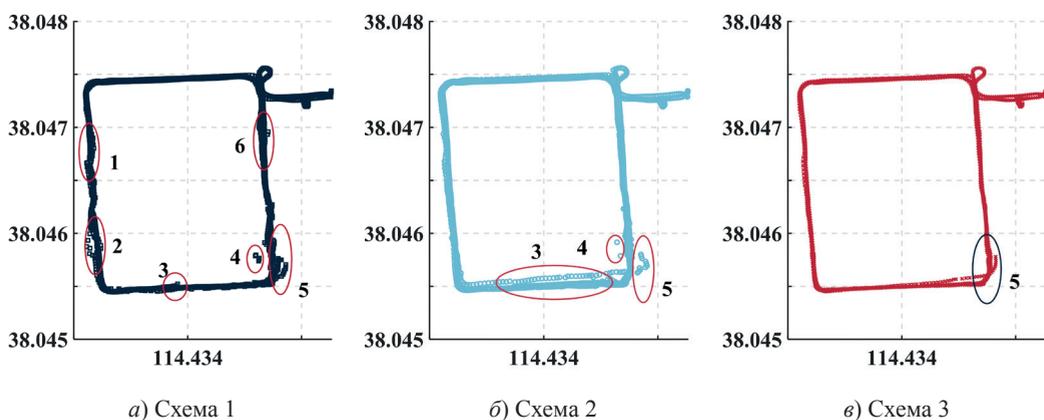


Рис. 10. Траектории определения местоположения объекта по трем схемам

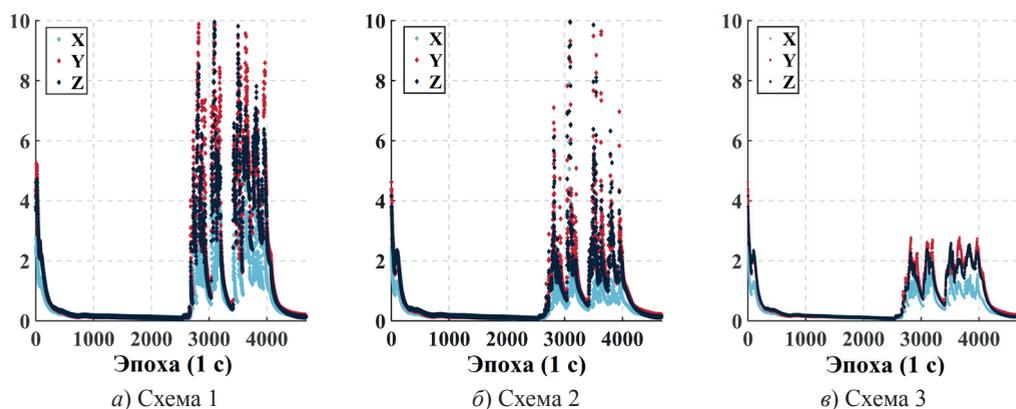


Рис. 11. Погрешности оценки координат, получаемых по трем схемам

При этом, однако, погрешности на участках 3 и 5 только возросли. Это может быть связано с тем, что при длительной потере сигнала погрешность расчета ско-

рости, несмотря на применение доплеровской скорости, может все же быть высокой из-за недостаточного количества наблюдаемых спутников. В итоге добавляется некорректное ограничение по скорости, что ухудшает результат. Схема 3 обеспечивает самое гладкое позиционирование (см. участки 1, 2, 3, 4 и 6 на рис. 10, а). Участок 5, хоть и неидеально гладкий, выглядит не хуже. На рис. 11 приведены погрешности оценок по этим трем схемам, а также подтверждается вклад данных о скорости в оценки параметров состояния в другом аспекте. В общем, дополнительные данные о скорости могут ускорить сходимость PPP-позиционирования и значительно повысить точность определения местоположения.

4. Заключение

В сложных условиях навигации, например в городе или геологически опасных районах, может происходить блокировка сигналов ГНСС, и из-за продолжительности сходимости решения значительно ограничивается применение кинематического высокоточного абсолютного позиционирования в режиме реального времени. В настоящей статье предлагается метод быстрого восстановления точности решения навигационной задачи в реальном времени за счет привлечения данных о скорости для реализации кинематического PPP-позиционирования. Поскольку в период сходимости PPP-решения скорость определяется достаточно точно, ее применение для сокращения времени сходимости PPP-позиционирования оправдано. В зависимости от состояния и условий движения адаптивно применяются различные данные о скорости. Поскольку неточная динамическая модель способна негативно влиять на результаты динамического позиционирования, роль данных о скорости при определении координат может постепенно снижаться при возобновлении приема сигналов ГНСС и постепенной сходимости решения задачи оценки неопределенности. На основе численного эксперимента по данным GPS были сделаны следующие выводы.

1. При симуляции кинематических условий оказалось возможным ускорить сходимость PPP-позиционирования за счет применения в полном объеме актуальных данных о состоянии объекта с учетом скорости и ускорения. Это позволяет значительно повысить точность и надежность результатов позиционирования, причем чем точнее данные о скорости, тем очевиднее его влияние на результат позиционирования.

2. При кинематических условиях, когда количество видимых спутников резко уменьшается из-за блокировки сигнала, новый метод позиционирования позволил значительно ускорить сходимость решения навигационной задачи PPP-позиционирования, обеспечить высокую точность и повысить непрерывность решения кинематической задачи определения местоположения.

Сходимости PPP-позиционирования посвящено множество исследований, предлагались разные методы. Дальнейшее усовершенствование PPP-позиционирования возможно за счет комбинирования различных методов, для чего требуются глубокие исследования, новые алгоритмы и информационное обеспечение.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Китайской национальной программы ключевых научно-исследовательских и конструкторских работ (проект «Исследо-

вание ключевых технологий по высокопрецизионному позиционированию и дистанционной связи для спасательной платформы при геологических катастрофах» №2019YFC1511504).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hein, G.W.**, Status, perspectives and trends of satellite navigation, *Satellite Navigation*, 2020, 1(1), 22.
2. **Geng, J., Chang, H., Guo, J., et al.**, Three multi-frequency and multi-system GNSS high-precision point positioning methods and their performance in complex urban environment [J], *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49, (1): 1–13, doi:10.11947/j. AGCS.2020.20190106.
3. **Tang, X., Jin, S., et al.**, Prior Position- and ZWD-Constrained PPP for Instantaneous Convergence in Real-Time Kinematic Application, 2021.
4. **Zhang, X., Li, X.**, Instantaneous re-initialization in real-time kinematic PPP with cycle slip fixing, *GPS Solut*, 2012, 16, 315–327, <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0233-9>.
5. **Banville, S., Langley, R.B.**, Instantaneous Cycle-Slip Correction for Real-Time PPP Applications, *NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation*, Winter 2010-2011, vol. 57, no. 4, pp. 325–334.
6. **Ding, W., Ou, J.**, Instantaneous re-initialization of real time kinematic PPP by adding doppler observation, *Journal of Astronautics*, 2013, doi:10.3873/j.issn.1000-1328.2013.06.008.
7. **Geng, J., Meng, X., Dodson, A.H. et al.**, Rapid re-convergences to ambiguity-fixed solutions in precise point positioning, *J. Geod.*, 2010, 84, 705–714, <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0404-4>.
8. **Kuang, C., Jin, L.**, Higher-order ionospheric error correction for precise point positioning, *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(8), 888–891+924.
9. **Song, C., Hao, J., Zhang, H.**, A method to accelerate PPP re-convergence with prior troposphere delay constraint, *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2015.
10. **Zheng, Y., Liu, J., Song, W., and Sun, H.**, PPP rapid convergence algorithm based on regional enhanced information, *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012.
11. **Wang, A., Zhang, Y., Chen, J. et al.**, Improving the (re-)convergence of multi-GNSS real-time precise point positioning through regional between-satellite single-differenced ionospheric augmentation, *GPS Solutions*, 2022, 26(2), 1–16.
12. **Cui, B., Wang, J., Li, P., et al.**, Modeling wide-area tropospheric delay corrections for fast PPP ambiguity resolution, *GPS Solutions*, 2022, 26, 56, <https://doi.org/10.1007/s10291-022-01243-1>.
13. **Tu, R.**, Fast determination of displacement by PPP velocity estimation, *Geophysical Journal International*, 2014 (3), 603.
14. **Su, K., Jin, S., Ge, Y.**, Rapid displacement determination with a stand-alone multi-GNSS receiver: GPS, Beidou, GLONASS, and Galileo, *GPS Solutions*, 2019, 23, 54, <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0840-4>.
15. **Zumberge, J., Hefflin, M., Jefferson, D., Watkins, M.M., 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.
16. **Kouba, J., and Héroux, P.**, Precise point positioning using IGS orbit and clock products, *GPS Solutions*, 2001, vol. 5, no. 2, pp. 12–28.
17. **Gao, Y., Lahaye, F., Héroux, P.**, Modeling and estimation of C1–P1 bias in GPS receivers, *Journal of Geodesy*, 2001, vol. 74, no. 9, pp. 621–626.
18. **Abdel-Salam, M.**, *Precise point positioning using undifferenced code and carrier phase observations*, PhD Thesis, 2005, University of Calgary, Calgary, AB, Canada.
19. **Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J.**, *Global Positioning System. Theory and Practice*, Springer Vienna, Springer-Verlag/Wien 2001, 382 p., <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6199-9>.
20. **Kalman, R.E.**, A new approach to linear filtering and prediction problems, *Journal of Basic Engineering Transactions*, 1960, vol. 82, pp. 35–45.
21. **Guo, F.**, *Theory and Methodology of Quality Control and Quality Analysis for GPS Precise Point Positioning*, Wuhan University Press, 2016.
22. **Wang, X.**, Comparison of GPS Velocity Obtained Using Three Different Estimation Models, *Gyroscopy and Navigation*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 138–148, doi: 10.1134/S2075108720020091.

Wang Xingxing, Sheng Chuanzhen, Yu Baoguo, Zhang Ziteng, Zhang Jingkui, Yi Qingwu (State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology, Shijiazhuang, China; The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, China)

Rapid Re-convergence of Real-time Dynamic Precise Point Positioning by Adding Velocity Constraints, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2022, vol. 30, no. 4 (119), pp. 152–168.

Abstract. In challenging environments like urban vehicle navigation and geological hazards, the GNSS signals are easily blocked, and the long re-convergence time seriously limits many applications of real-time dynamic precise point positioning. Considering that the velocity accuracy is better than the position during re-convergence epochs, we proposed a real-time rapid-positioning method by introducing velocity constraints into the dynamic PPP. According to the different motion states and environments, different velocity constraints are used adaptively. For example, the zero-velocity constraint model is used in the stationary state; the Doppler-velocity constraint model is used when the most visible satellites are temporarily blocked; the other-sensors-velocity constraint model is used when the satellite signal is blocked frequently. Considering that the inaccurate dynamic model will affect the dynamic positioning results, the velocity constraint can be gradually relaxed after the GNSS signals are reacquired and the ambiguity gradually converges. Based on static and kinematic experiments with GPS data, the results show that when the number of visible satellites is greatly dropped due to signal blocking, the new positioning method can significantly speed up the re-convergence of precise point positioning, maintain high accuracy and improve the continuity of real-time dynamic positioning in a short time.

Key words: reconvergence, dynamic precise point positioning, velocity constraints, real-time, signal blocking.

Материал поступил 05.10.2022