

УДК 528.2:629.78

Э.Н. Хомяков, В.Н. Медведев, Ле Тхань Тунг

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ НЕПОДВИЖНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ

*Рассмотрена задача оценки вектора состояния неподвижного потребителя с использованием сигналов навигационных космических аппаратов глобальной навигационной спутниковой системы GPS. С использованием имитационной модели исследована потенциальная точность оценок вектора состояния неподвижного потребителя при обработке измерений методом фильтра Калмана. С использованием известных систематических погрешностей измерения кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей выполнен анализ уровня этих погрешностей и соответствующих смещений в оценках вектора состояния потребителя. Исходные данные и результаты моделирования приведены применительно к условиям Вьетнама.*

**Ключевые слова:** навигационная спутниковая система, вектор состояния, неподвижный потребитель, кодовая псевдодальность, фазовая псевдоскорость, фильтр Калмана.

### Введение

В настоящее время глобальные навигационные спутниковые системы ГЛОНАСС, GPS находятся в стадии активного функционирования. Быстрыми темпами создается система BEIDOU-2 (COMPASS) в Китайской Народной Республике. Интенсивно в последнее время ведутся работы по запуску навигационных космических аппаратов системы GALILEO в Европейском Союзе. В Японии и Индии функционируют национальные функциональные дополнения к глобальным навигационным спутниковым системам.

Основная роль глобальных навигационных спутниковых систем заключается в решении задач высокоточной навигации подвижных объектов.

Однако наиболее часто на практике эти системы решают задачу оперативного и высокоточного оценивания вектора состояния неподвижного потребителя [1].

Речь идет, прежде всего, об оценке координат неподвижных объектов.

К таким объектам относятся искусственные сооружения (мосты, дамбы, здания, контрольные станции, антенны радиоэлектронных систем и т.д.). Данная задача лежит в основе развития геодезических сетей. Эта задача решается при планировании и учете земельных ресурсов, при строительстве дорог, линий электропередач, нефтяных и газовых магистралей.

Часто необходимо отслеживать с предельно высокой точностью смещения естественных образований для предупреждения землетрясений и цунами.

Наконец, в настоящее время актуальной является и задача синхронизации пространственно-распределенных эталонов времени и частоты. Срав-

нение шкал времени и частот опорных генераторов необходимо для нормальной работы радиоэлектронных комплексов контроля траекторий и управления движением летательных аппаратов. Решение такой задачи необходимо также в системах связи при временном уплотнении каналов.

Все перечисленные задачи актуальны для всех стран, в том числе для Вьетнама.

Рассматривая карту Вьетнама (рис. 1), можно сделать заключение о целесообразности применения, прежде всего, множества локальных контрольных станций по побережью, а также в аэропортах Ханоя и Хошимина.

С учетом важности задачи оценки вектора состояния неподвижного потребителя представляет интерес исследовать методом имитационного моделирования потенциальные и реальные точностные характеристики спутниковой навигационной системы GPS применительно к условиям Вьетнама при сравнительно небольших интервалах времени наблюдения. В частности, представляет интерес исследовать:

- уровень полных и среднеквадратических погрешностей оценок вектора состояния неподвижного потребителя при отсутствии систематических погрешностей наблюдения кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей, но при наличии случайных погрешностей с известными среднеквадратическими значениями,

- уровень систематических погрешностей наблюдения кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей, обусловленных атмосферной (тропосферной и ионосферной) рефракцией, а также погрешностями в знании векторов состояния навигационных космических аппаратов рабочего созвездия,



Рис. 1. Географическая карта Вьетнама

- уровень полных и среднеквадратических погрешностей оценок вектора состояния неподвижного потребителя при наличии как систематических, так и случайных погрешностей наблюдения кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей.

## 1. Краткая характеристика основных модулей имитационной модели спутниковой системы оценки вектора состояния неподвижного потребителя

### 1.1. Структура имитационной модели

Учебно-исследовательская программа имитационного моделирования спутниковой системы оценки вектора состояния неподвижного потребителя состоит из шести модулей:

- модуль планирования сеанса навигационных измерений и определений, выбора четырех навигационных космических аппаратов GPS и расчета их эфемерид,
- модуль формирования процессов смещения шкалы времени потребителя относительно систем-

ного времени и смещения частоты относительно номинального значения,

- модуль формирования случайных погрешностей наблюдения кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей,
- модуль оценки вектора состояния неподвижного потребителя при отсутствии систематических погрешностей измерений,
- модуль расчета систематических погрешностей измерений кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей,
- модуль оценки вектора состояния неподвижного потребителя при наличии систематических погрешностей измерений.

### 1.2. Модуль планирования сеанса навигационных измерений и определений, выбора четырех навигационных космических аппаратов GPS и расчета их эфемерид

Исходными данными здесь являются:

- файл с геодезическими координатами фазовых центров антенн аппаратуры потребителей,
- календарная дата сеанса,
- время начала и окончания сеанса,
- дискретность наблюдений во времени,
- альманах параметров орбит навигационных космических аппаратов GPS.

Выходными данными данного модуля являются гринвичские координаты и составляющие вектора скорости (эфемериды) выбранных навигационных космических аппаратов, вычисленные в пределах сеанса с заданной дискретностью во времени.

Выбор четырех рабочих навигационных космических аппаратов осуществляется оператором визуально с использованием наглядной навигационной обстановки, а также таблицы азимутов и углов возвышения навигационных космических аппаратов над плоскостью местного горизонта.

Для обеспечения наилучшего геометрического фактора один навигационный космический аппарат выбирается с максимальным углом возвышения над плоскостью горизонта.

Остальные три навигационных космических аппарата выбираются с углами возвышения над горизонтом выше трех градусов при наиболее равномерном смещении по азимуту.

### 1.3. Модуль формирования случайных погрешностей наблюдения кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей

В модуле формируются случайные погрешности наблюдения кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей с нулевыми математическими ожиданиями и заданными среднеквадратическими значениями.

Исходными данными являются среднеквадратические значения случайных погрешностей из отдельного редактируемого файла ini.dat.

#### **1.4. Модуль формирования процессов смещения шкалы времени потребителя относительно системного времени и смещения частоты относительно номинального значения**

В модуле формируются процессы смещения шкалы времени потребителя относительно системного времени и смещения частоты относительно номинального значения с использованием модели двумерной марковской последовательности. В качестве параметров модели используются:

- ширина энергетического спектра частотных флуктуаций,
- спектральная плотность интенсивности возмущающего белого шума,
- начальное смещение шкалы времени,
- начальное смещение частоты опорного генератора.

Выходной информацией является двумерная последовательность, используемая при формировании псевдодальностей и псевдоскоростей и выводимая в отдельный файл.

#### **1.5. Модуль оценки вектора состояния неподвижного потребителя при отсутствии систематических погрешностей наблюдения**

Исходными данными для данного модуля программы являются:

- файл с геодезическими координатами фазовых центров антенн аппаратуры потребителей, причем, выбор потребителя из списка осуществляется оператором,
- файл эфемерид выбранных рабочих навигационных космических аппаратов GPS,
- редактируемый файл, содержащий заданные среднеквадратические погрешности измерений кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей, заданные значения параметров модели частотно-временных флуктуаций аппаратуры потребителя, заданные значения начальных смещений шкалы времени и частоты.

Программа запрашивает размерность оцениваемого вектора состояния потребителя (5 или 3).

В первом случае оцениваются три координаты, смещение шкалы времени потребителя относительно системного времени GPS и смещение частоты опорного генератора потребителя относительно номинального значения. При этом обрабатываются четыре кодовые псевдодальности и четыре фазовые псевдоскорости.

Во втором случае оцениваются только координаты потребителя по измерениям первых разностей

по навигационным космическим аппаратам кодовых псевдодальностей и первых разностей по навигационным космическим аппаратам фазовых псевдоскоростей.

В обоих случаях при обработке используется алгоритм фильтра Калмана, линейный по состоянию и нелинейный по наблюдениям.

Выходной информацией данного модуля являются:

- файл с измеряемыми функциями,
- файл с наблюдаемыми функциями (к измеряемым функциям здесь добавлены случайные погрешности измерений кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей, которые формируются в отдельном модуле программы),
- файл калмановских оценок вектора состояния потребителя,
- файл полных и среднеквадратических погрешностей оценок вектора состояния потребителя.

#### **1.6. Модуль расчета систематических погрешностей наблюдения кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей**

В данном модуле с использованием известных моделей тропосферных и ионосферных погрешностей наблюдения кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей эти погрешности вычисляются с учетом конкретной навигационной обстановки для конкретного потребителя.

Исходной информацией являются:

- файл с координатами потребителей,
- файл с эфемеридами рабочих навигационных космических аппаратов,
- редактируемый файл с параметрами модели высотного профиля показателя преломления в тропосфере,
- редактируемый файл с параметрами модели высотного профиля электронной концентрации в ионосфере.

Для учета погрешностей в знании эфемерид рабочих навигационных космических аппаратов используется дополнительный редактируемый файл, содержащий значения таких погрешностей.

Выходной информацией данного модуля являются файлы с вычисленными систематическими погрешностями наблюдения кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей для каждого потребителя.

Программа данного модуля позволяет вывести результаты вычислений для всего списка потребителей.

При вычислениях для одного потребителя из списка программа позволяет вывести графическую информацию по каждому навигационному космическому аппарату и по каждому типу погрешности (тропосферной, ионосферной, эфемеридной и суммарной).

При необходимости исследовать влияние конкретного типа систематической погрешности в выходные файлы можно вывести только эти погрешности.

### 1.7. Модуль оценки вектора состояния неподвижного потребителя при наличии систематических погрешностей наблюдения

Исходными данными для данного модуля программы являются:

- файл с геодезическими координатами фазовых центров антенн аппаратуры потребителей, причем, выбор потребителя из списка осуществляется оператором,
- файл эфемерид выбранных рабочих навигационных космических аппаратов GPS,
- файл систематических погрешностей наблюдения кодовых псевдодалностей и фазовых псевдоскоростей, выбираемый с использованием файла конфигурации в соответствии с выбранными координатами аппаратуры потребителя,
- редактируемый файл, содержащий заданные среднеквадратические погрешности измерений кодовых псевдодалностей и фазовых псевдоскоростей, заданные значения параметров модели частотно-временных флуктуаций аппаратуры потребителя, заданные значения начальных смещений шкалы времени и частоты.

Программа запрашивает вновь размерность оцениваемого вектора состояния потребителя (5 или 3). В первом случае оцениваются три координаты, смещение шкалы времени потребителя относительно системного времени GPS и смещение частоты опорного генератора потребителя относительно номинального значения. При этом обрабатываются четыре кодовые псевдодалности и четыре фазовые псевдоскорости. Во втором случае оцениваются только координаты потребителя по измерениям трех первых разностей по навигационным космическим аппаратам кодовых псевдодалностей и трех первых разностей по навигационным космическим аппаратам фазовых псевдоскоростей.

В обоих случаях при обработке используется алгоритм фильтра Калмана, линейный по состоянию и нелинейный по наблюдениям.

Выходной информацией данного модуля являются:

- файл с измеряемыми функциями,
- файл с наблюдаемыми функциями (к измеряемым функциям здесь добавлены случайные и систематические погрешности наблюдения кодовых псевдодалностей и фазовых псевдоскоростей, которые формируются в отдельных модулях программы),
- файл калмановских оценок вектора состояния потребителя,
- файл полных и среднеквадратических погрешностей оценок вектора состояния потребителя.

## 2. Анализ систематических погрешностей наблюдения кодовых псевдодалностей и фазовых псевдоскоростей

### 2.1. Анализ тропосферных погрешностей

При имитационном моделировании спутниковой системы оценки вектора состояния неподвижного потребителя использовалась двойная экспоненциальная модель высотного профиля индекса тропосферной рефракции [2]:

$$\delta_{N_u} = \frac{0,7764}{T_K^\circ} \left( P + \frac{4810}{T_K^\circ} P_w \right),$$

$$\text{где } P_w = 6,11 \cdot \text{HM}\% \cdot 10^y; \quad y = \frac{7,5 \cdot t_C^\circ}{237,3 + t_C^\circ};$$

$$\delta_{D_{kjT}} = m_{kj} \cdot \left[ \frac{\delta N_{\Pi} - 92}{\gamma_1} + \frac{91,5}{\gamma_2} \right] \cdot 10^{-3};$$

$$\dot{\delta}_{D_{kjT}} = \dot{m}_{kj} \cdot \left[ \frac{\delta N_{\Pi} - 92}{\gamma_1} + \frac{91,5}{\gamma_2} \right] \cdot 10^{-3},$$

$$m_{kj} = \begin{cases} 1/\sin \beta_{kj}; & \beta_{kj} \geq 15^\circ; \\ \frac{1}{\sin \beta_{kj} + \frac{a}{\sin \beta_{kj} + \frac{b}{\sin \beta_{kj} + \frac{c}{\sin \beta_{kj}}}}}; & \beta_{kj} \geq 3^\circ, \end{cases}$$

a, b, c – функции  $T_K^\circ, P, P_w, \text{HM}$ .

### 2.2. Анализ ионосферных погрешностей

При имитационном моделировании спутниковой системы оценки вектора состояния неподвижного потребителя использовалась двойная экспоненциальная модель высотного профиля электронной концентрации [2]:

$$N(h) = \begin{cases} 0, & h < h_{0u} \approx 100 \text{ км}; \\ N_{\max} \cdot \gamma \left[ e^{-\frac{h-h_{0u}}{h_1}} - e^{-\frac{h-h_{0u}}{h_2}} \right], & h > h_{0u}, \end{cases}$$

при этом

$$\delta_{D_{kju}} = \frac{40,38}{f^2 \cdot \sin \beta_{kjm}} N_{\Sigma}, \quad N_{\Sigma} = \int_0^{\infty} N(h) dh,$$

$$\sin \beta_{kjm} = \sqrt{1 - (R/(R_3 + h_m))^2 \cdot \cos^2 \beta_{kj0}},$$

$$h_m = h_{0u} + \frac{h_1 \cdot h_2}{h_1 - h_2} \ln \frac{h_1}{h_2},$$

$$N_{\Sigma} = \gamma \cdot N_{\max} (h_1 - h_2) \cdot 10^3 \quad 1/\text{м}^2,$$

$$\gamma^{-1} = \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{h_2}{h_1 - h_2}} - \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{h_1}{h_1 - h_2}}.$$

### 2.3. Анализ эфемеридных погрешностей

Для анализа уровня эфемеридных погрешностей наблюдения кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей использованы соотношения

$$\delta \bar{R}_{kj} = \bar{C}_{skj} \cdot \delta \bar{\lambda}_{skj},$$

где 
$$\bar{C}_{skj} = \frac{\partial \bar{R}_{kj}}{\partial \bar{\lambda}_{skj}} \bigg|_{\bar{\lambda}_{skj}}, \quad \bar{R}_{kj}^T = \left\{ \bar{D}_{kj}, \dot{\bar{D}}_{kj} \right\},$$

$$\delta \bar{\lambda}_{skj} = \hat{\lambda}_{skj} - \bar{\lambda}_{skj}.$$

## 3. Алгоритм фильтра Калмана

### 3.1. Уравнения наблюдения

Уравнение наблюдения в задаче оценки вектора состояния неподвижного потребителя имеет вид:

$$\bar{u}_k = \bar{R}_k(\bar{\lambda}_k, \bar{\lambda}_{sk}) + \bar{n}_k,$$

где  $\bar{u}_k$  – наблюдаемые кодовые псевдодальности и фазовые псевдоскорости,  $\bar{R}_k$  – измеряемые кодовые псевдодальности и фазовые псевдоскорости,  $\bar{\lambda}_k$  – пятимерный вектор состояния неподвижного потребителя, подлежащий оцениванию и состоящий из трех координат, погрешности шкалы времени  $\delta_{Tk}$  и погрешности частоты  $\delta f_k$ ,  $\bar{\lambda}_{sk}$  – блочный вектор расчетных эфемерид навигационных космических аппаратов,  $\bar{n}_k$  – вектор погрешностей наблюдения, причем,

$$\bar{n}_k = \delta \bar{n}_k + \overset{\circ}{\bar{n}}_k.$$

Систематические погрешности здесь обусловлены, главным образом, эффектом атмосферной рефракции и эфемеридными погрешностями навигационных космических аппаратов. Векторная функция случайных погрешностей полагается гауссовской некоррелированной последовательностью с характеристиками:

$$\left\langle \overset{\circ}{\bar{n}}_k \right\rangle = \bar{0}; \quad \left\langle \overset{\circ}{\bar{n}}_k \cdot \overset{\circ}{\bar{n}}_k^T \right\rangle = \underline{N}_k; \quad \left\langle \overset{\circ}{\bar{n}}_k \cdot \overset{\circ}{\bar{n}}_l^T \right\rangle = \underline{0} \quad \text{при } l \neq k.$$

Измеряемые функции здесь определяются как

$$\bar{D}_{kj} = D_{kj} + c \cdot \delta_{Tk} - c \cdot \delta_{Tsjk};$$

$$\bar{D}_{kj} = D_{kj} + c \cdot \frac{\delta f_k}{f_0} - c \cdot \frac{\delta f_{sjk}}{f_0}.$$

### 3.2. Уравнения динамики вектора состояния неподвижного потребителя

Динамика пятимерного вектора состояния неподвижного потребителя характеризуется разностными уравнениями [2]:

$$x_k = x_{k-1}; \quad y_k = y_{k-1}; \quad z_k = z_{k-1}$$

$$\delta_{Tk} = \delta_{Tk-1} + \frac{1-\rho}{\alpha \cdot f_0} \cdot \delta f_{k-1} + \eta_{Tk}; \quad \delta f_k = \rho \cdot \delta f_{k-1} + \eta_{fk}.$$

В этих выражениях

$$\rho = \exp\{-\alpha \cdot \Delta t\}, \quad \Delta t = t_k - t_{k-1},$$

где  $\alpha$  – ширина энергетического спектра частотных флуктуаций,  $f_0$  – номинальное значение частоты генератора.

Случайные последовательности  $\eta_{Tk}$ ,  $\eta_{fk}$  характеризуют флуктуации поведения шкалы времени и частоты генератора. Их статистические характеристики при условии  $\alpha \cdot \Delta t \ll 1$  в принятой в работе модели определяются выражениями

$$\langle \eta_{Tk} \rangle = \langle \eta_{fk} \rangle = 0; \quad \langle \eta_{Tk}^2 \rangle = \sigma_f^2 \cdot \frac{\Delta t^2}{3f_0^2};$$

$$\langle \eta_{fk}^2 \rangle = \sigma_f^2; \quad \langle \eta_{Tk} \cdot \eta_{fk} \rangle = -\sigma_f^2 \cdot \frac{\Delta t}{2f_0}.$$

В последних соотношениях  $\sigma_f^2$  – дисперсия частотных флуктуаций, причем  $\sigma_f^2 = \Theta_{\xi f} \cdot \frac{\Delta t}{2}$ , где  $\Theta_{\xi f}$  – спектральная плотность интенсивности частотных флуктуаций.

### 3.3. Алгоритм фильтра Калмана

Соотношения для алгоритма фильтра Калмана имеют вид [3]:

$$\tilde{\lambda}_k = \bar{\lambda}_k^* + \underline{H}_k \cdot \left[ \bar{u}_k - \bar{R}_k \left( \bar{\lambda}_k^*, \bar{\lambda}_{sk} \right) \right],$$

$$\bar{\lambda}_k^* = \underline{\Phi} \cdot \tilde{\lambda}_{k-1}, \quad k = 1, 2, \dots, M; \quad \tilde{\lambda}_0 = \bar{\lambda}_0,$$

где  $\underline{\Phi}$  – переходная матрица системы разностных уравнений динамики вектора состояния потребителя,

$$\underline{H}_k = \tilde{\Sigma}_k \cdot \underline{C}_k^T \cdot \underline{N}_k^{-1}, \quad \underline{C}_k = \frac{\partial \bar{R}_k}{\partial \lambda_k} \bigg|_{\bar{\lambda}_k^*} -$$

матрица усиления фильтра Калмана и матрица чувствительности измеряемых функций к вектору состояния потребителя

$$\tilde{\Sigma}_k = \left[ \overset{*}{\Sigma}_k + \underline{C}_k^T \cdot \underline{N}_k^{-1} \cdot \underline{C}_k \right]^{-1} -$$

матрица дисперсий и ковариаций калмановских оценок,

$$\overset{*}{\Sigma}_k = \underline{\Phi} \cdot \tilde{\Sigma}_{k-1} \cdot \underline{\Phi}^T + \underline{\Theta}_\eta -$$

матрица дисперсий и ковариаций прогнозируемых оценок.

## 4. Исходные данные и результаты имитационного моделирования спутниковой системы оценки вектора состояния неподвижного потребителя

### 4.1. Исходные данные

Для моделирования выбран сеанс на 12 декабря 2012 года с 08:00:00 до 08:02:01 (UTC) с дискретностью 1 секунда (рис. 2).

Таблица 1

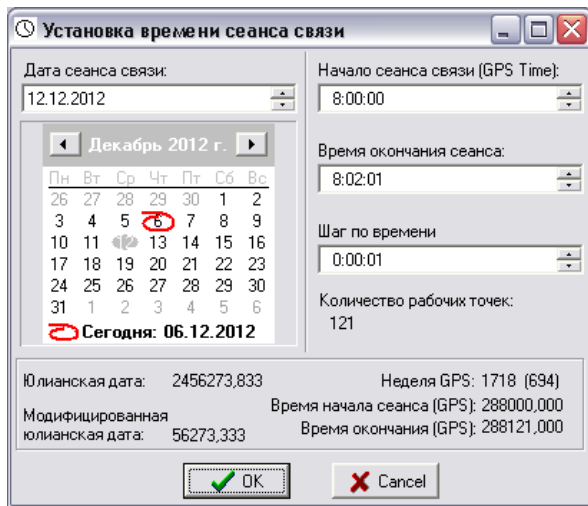


Рис. 2. Установка даты и времени сеанса

Для моделирования выбраны потребители, координаты которых даны в табл. 1, где долгота и широта представлены в градусах, угловых минутах и секундах, а геодезическая высота в метрах.

Координаты потребителя

Город	L0	B0	H0	Азимут
Ханой 0	105 45 00	20 50 00	220	00 00 00
Хайфон 1	106 40 00	20 30 00	100	00 00 00
Винь 2	105 45 00	18 52 00	140	00 00 00
Дананг 3	108 10 00	16 00 00	120	00 00 00
Ньячанг 4	109 00 00	12 20 00	180	00 00 00
Хошимин 5	107 00 00	10 30 00	200	00 00 00

Здесь

Планирование сеанса выполнено для потребителя в городе Дананг, расположенного приблизительно в центре Вьетнама.

По файлу альманаха параметров орбит навигационных космических аппаратов GPS 061212n.alm для данного сеанса с использованием программы SatWatcher выбраны аппараты с номерами 15, 05, 21, 25, вычислены их гринвичские координаты и скорости с дискретностью 1 секунда.

Навигационная обстановка в выбранном сеансе в городе Дананг приведена на рис. 3.

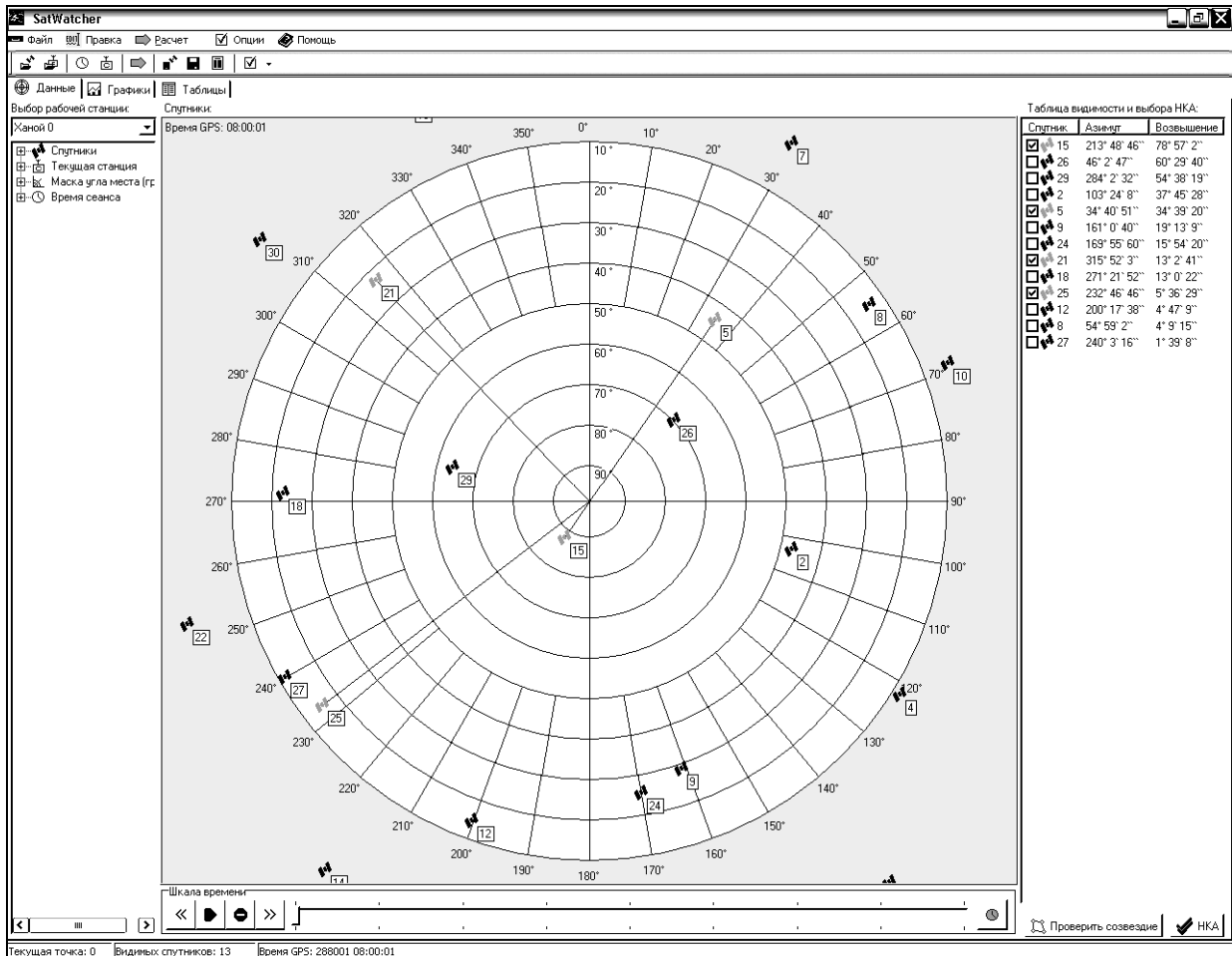


Рис. 3. Навигационная обстановка в Дананге

Для вычислений систематических погрешностей использованы параметры моделей тропосферной и ионосферной рефракции, приведенные в табл. 2, в которой используются обозначения: T– температура

в градусах Цельсия, p–давление воздуха в паскалях, НМ– влажность в процентах, h1, h2 – параметры двухэкспоненциальной модели высотного профиля электронной концентрации в км, h0–высота антенны

потребителя в км,  $H_t$  – эффективная высота тропосферы в км,  $N$  – максимальная электронная концентрация в  $1/m^3$ ,  $f_0$  – несущая частота в гигагерцах.

Таблица 2

Параметры обстановки

	T	p	HM	h1	h2	h0	Ht	N	f0
1	20	101000	55	325	225	0,22	10	5e11	1,57542
2	22	101000	70	325	225	0,10	10	6e11	1,57542
3	24	101500	65	325	225	0,14	10	8e11	1,57542
4	26	101000	61	325	225	0,12	10	8e11	1,57542
5	27	101600	62	325	225	0,18	10	9e11	1,57542
6	28	101020	50	325	225	0,20	10	1e12	1,57542

Погрешности в знании координат навигационных космических аппаратов полагались на уровне единиц метров, скоростей – единиц см /с. Погрешности в знании смещения шкал времени навигационных космических аппаратов полагались на уровне десятков наносекунд, а погрешности в знании относительного смещения частот бортовых генераторов – на уровне  $10^{-12}$ .

## 4.2. Промежуточные результаты моделирования

С использованием программы CorWin вычислены систематические погрешности наблюдения кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей для всех выбранных потребителей, а также для всех навигационных космических аппаратов рабочего созвездия.

В табл. 3 приведен фрагмент файла систематических погрешностей наблюдения кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей для потребителя в городе Ханой.

Наибольшие значения систематических погрешностей имеют место, как и следовало ожидать, для навигационного космического аппарата № 25 с наименьшим углом возвышения над плоскостью местного горизонта.

Табл. 4 содержит фрагмент файла измеряемых функций. В табл. 5 приведен фрагмент файла наблюдаемых функций применительно к потребителю в Ханое.

Таблица 3

Систематические погрешности наблюдения кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей в Ханое

E_System ERROR for Satellite N 15 Пункт:Ханой-0 Индекс рефракции:323.25344									
time	dRтр,м	dRvтр,м/с	dRин,м	dRвин,м/с	dRчв,м	dRlvчв,м/с	S,м	Sv,м/с	beta
08:00:01	3.2895	-0.0001	6.1520	-0.0002	8.2040	0.0558	17.6455	0.0556	78.9506
08:00:02	3.2894	-0.0001	6.1518	-0.0002	8.2043	0.0558	17.6456	0.0556	78.9588
08:00:03	3.2893	-0.0001	6.1517	-0.0002	8.2047	0.0558	<b>17.6457</b>	0.0556	78.9670
E_System ERROR for Satellite N 5 Пункт:Ханой-0 Индекс рефракции:323.25344									
time	dRтр,м	dRvтр,м/с	dRин,м	dRвин,м/с	dRчв,м	dRlvчв,м/с	S,м	Sv,м/с	beta
08:00:01	5.6637	0.0005	9.6226	0.0008	5.2585	0.0209	20.5448	0.0223	34.6555
08:00:02	5.6642	0.0005	9.6233	0.0008	5.2579	0.0209	20.5454	0.0222	34.6518
08:00:03	5.6647	0.0005	9.6240	0.0008	5.2574	0.0209	<b>20.5461</b>	0.0222	34.6480
E_System ERROR for Satellite N 21 Пункт:Ханой-0 Индекс рефракции:323.25344									
time	dRтр,м	dRvтр,м/с	dRин,м	dRвин,м/с	dRчв,м	dRlvчв,м/с	S,м	Sv,м/с	beta
08:00:01	13.9986	-0.0051	15.5241	-0.0034	6.6403	0.1027	36.1630	0.0943	13.0447
08:00:02	13.9936	-0.0050	15.5223	-0.0034	6.6403	0.1027	36.1562	0.0943	13.0498
08:00:03	13.9885	-0.0050	15.5206	-0.0034	6.6404	0.1027	<b>36.1494</b>	0.0943	13.0548
E_System ERROR for Satellite N 25 Пункт:Ханой-0 Индекс рефракции:323.25344									
time	dRтр,м	dRvтр,м/с	dRин,м	dRвин,м/с	dRчв,м	dRlvчв,м/с	S,м	Sv,м/с	beta
08:00:01	29.7750	0.0117	17.8491	0.0025	5.7060	0.1151	53.3301	0.1293	5.6079
08:00:02	29.7867	0.0117	17.8498	0.0025	5.7055	0.1151	53.3420	0.1293	5.6052
08:00:03	29.7984	0.0118	17.8504	0.0025	5.7050	0.1150	<b>53.3539</b>	0.1293	5.6025

Таблица 4

Изменяемые функции относительно рабочих навигационных космических аппаратов Ханой\_0 (12.12.2012). Номера рабочих НИСЗ 15 5 21 25

t	D	Dv	D	Dv	D	Dv	D	Dv
08:00:01	20232727.493	-128.622	22499011.658	310.087	24983998.177	-536.141	25308006.346	291.409
08:00:02	20232598.790	-128.480	22499321.579	310.100	24983461.912	-536.145	25308297.641	291.405
08:00:03	20232470.257	-128.357	22499631.513	310.103	24982925.592	-536.174	25308588.929	291.385
08:00:04	20232341.799	-128.291	22499941.509	310.040	24982389.369	-536.254	25308880.222	291.305



Таблица 5

Наблюдаемые функции относительно рабочих навигационных космических аппаратов  
Ханой\_0 (12.12.2012). Номера рабочих НИСЗ 15 5 21 25

t	D	Dv	D	Dv	D	Dv	D	Dv
08:00:01	20232745.798	-128.563	22499032.265	310.136	24984034.165	-536.031	25308059.524	291.542
08:00:02	20232616.746	-128.408	22499341.969	310.134	24983497.557	-536.019	25308351.439	291.548
08:00:03	20232487.798	-128.332	22499652.353	310.084	24982961.701	-536.130	25308642.602	291.440

### 4.3. Основные результаты моделирования

Программа моделирования позволяет вывести в файлы калмановские оценки векторов состояния неподвижного потребителя как при отсутствии, так и при наличии систематических погрешностей наблюдения кодовых псевдодалностей и фазовых псевдоскоростей.

Наибольший интерес представляют файлы с полными и среднеквадратическими погрешностями оценок вектора состояния потребителей.

Табл. 6 содержит фрагмент файла с полными (dX, dY, dZ, delta\_t, df) и среднеквадратическими

(sX, sY, sZ, sigma\_t, sf) погрешностями оценок вектора состояния неподвижного потребителя в Ханое, которые иллюстрируют потенциальные точностные характеристики спутниковой системы.

Результаты получены при среднеквадратических погрешностях наблюдения кодовых псевдодалностей порядка 0.3 м и при среднеквадратических погрешностях наблюдения псевдоскоростей порядка 0.01 м/с для других потребителей. В табл. 7 приведены полные и среднеквадратические погрешности оценок вектора состояния потребителя в Ханое с учетом полных погрешностей наблюдения кодовых псевдодалностей и фазовых псевдоскоростей.

Таблица 6

Полные и среднеквадратические погрешности оценок вектора состояния потребителя в Ханое **при отсутствии** систематических погрешностей наблюдения кодовых псевдодалностей и фазовых псевдоскоростей

Время	dX	sX	dY	sY	dZ	sZ	delta t	sigma t	df	sf
08:00:11	0.09	0.18	-0.06	0.13	0.12	0.12	-2.8E-10	4.2E-10	0.008	0.026
08:00:12	0.12	0.17	-0.00	0.13	0.09	0.12	-2.6E-10	4.0E-10	-0.012	0.026
08:01:33	0.02	0.06	0.01	0.05	0.01	0.04	4.2E-10	1.4E-10	0.024	0.026
08:01:34	0.01	0.06	0.01	0.05	0.01	0.04	4.2E-10	1.4E-10	0.018	0.026
08:01:35	0.02	0.06	0.01	0.05	0.01	0.04	4.4E-10	1.4E-10	0.030	0.026
08:01:36	0.02	0.06	0.01	0.04	0.01	0.04	4.4E-10	1.4E-10	0.019	0.026
08:01:37	0.01	0.06	0.01	0.04	0.01	0.04	4.0E-10	1.4E-10	0.018	0.026
08:01:38	0.02	0.06	-0.00	0.04	0.02	0.04	3.6E-10	1.4E-10	-0.077	0.026
<b>08:01:39</b>	<b>0.02</b>	<b>0.06</b>	<b>-0.00</b>	<b>0.04</b>	<b>0.02</b>	<b>0.04</b>	<b>4.6E-10</b>	<b>1.3E-10</b>	<b>0.043</b>	<b>0.026</b>

Таблица 7

Полные и среднеквадратические погрешности оценок вектора состояния потребителя в Ханое **при наличии** систематических погрешностей наблюдения кодовых псевдодалностей и фазовых псевдоскоростей

Время	dX	sX	dY	sY	dZ	sZ	delta t	sigma t	df	sf
08:00:02	-5.45	0.27	12.27	0.44	10.60	0.31	7.944E-08	1.1E-09	0.386	0.026
08:00:03	-7.27	0.22	16.66	0.36	14.06	0.25	1.062E-07	8.6E-10	0.436	0.026
08:01:53	-9.53	0.04	26.58	0.06	22.10	0.04	4.923E-08	1.2E-10	0.262	0.026
08:01:54	-9.50	0.04	26.62	0.06	22.13	0.04	4.833E-08	1.2E-10	0.293	0.026
08:01:55	-9.47	0.04	26.65	0.06	22.15	0.04	4.735E-08	1.2E-10	0.276	0.026
08:01:56	-9.45	0.03	26.69	0.06	22.18	0.04	4.642E-08	1.2E-10	0.309	0.026
08:01:57	-9.42	0.03	26.73	0.06	22.21	0.04	4.548E-08	1.2E-10	0.324	0.026
08:01:58	-9.38	0.03	26.77	0.06	22.25	0.04	4.453E-08	1.2E-10	0.276	0.026
08:01:59	-9.35	0.03	26.82	0.06	22.28	0.04	4.361E-08	1.2E-10	0.250	0.026
08:02:00	-9.32	0.03	26.86	0.06	22.31	0.04	4.266E-08	1.2E-10	0.266	0.026
<b>08:02:01</b>	<b>-9.28</b>	<b>0.03</b>	<b>26.90</b>	<b>0.06</b>	<b>22.34</b>	<b>0.04</b>	<b>4.173E-08</b>	<b>1.2E-10</b>	<b>0.240</b>	<b>0.026</b>

### Краткие выводы

1. Имитационное моделирование позволяет дать количественную оценку систематических по-

грешностей наблюдения кодовых псевдодалностей и фазовых псевдоскоростей в конкретных условиях атмосферной рефракции и навигационной обстановки (табл. 3).



2. Потенциальная точность оценок вектора состояния неподвижных потребителей характеризуется данными таблицы 6 применительно к исходным данным моделирования. Исследования показали, что при увеличении среднеквадратических погрешностей наблюдения кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей на порядок примерно в такой же пропорции увеличиваются среднеквадратические погрешности оценок координат потребителя.

3. Систематические погрешности оценок координат неподвижного потребителя применительно к условиям моделирования имеют порядок десятков метров (табл. 7). Систематические погрешности оценок смещения шкалы времени потребителя имеют порядок десятков наносекунд.

4. Дальнейшее совершенствование имитационной модели предполагает использование более современных моделей тропосферной и ионосферной

рефракции, учет погрешностей, обусловленных многолучевостью приема навигационных сигналов.

## Список литературы

1 Гофманн-Велленгоф Б. . Глобальна система визначення местоположення (GPS). Теорія і практика: Пер. з англ. / Б. Гофманн-Велленгоф, Г. Ліхтенегер, Д. Коллінз. Під ред. Я.С. Яцківа. – К.: Наукова думка, 1995. – 380 с.

2 Спутниковые системы координатно-временного обеспечения неподвижного потребителя / Э.Н. Хомяков, Е.Э. Наумова, С.Г. Шаповалов, Д.В. Трикоз. – Учеб. пос. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “Харьк. авиац. ин-т”, 2000. – 109 с.

3. Фалькович С.Е. Статистическая теория измерительных радиосистем / С.Е. Фалькович, Э.Н. Хомяков. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.

Поступила в редколлегию 24.01.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.В. Лукин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ ОЦІНКИ ВЕКТОРА СТАНУ НЕРУХОМОГО СПОЖИВАЧА

Е.М. Хомяков, В.М. Медведев, Ле Тхань Тунг

*Розглянуто задачу оцінки вектора стану нерухомого споживача з використанням сигналів навігаційних космічних апаратів глобальної навігаційної супутникової системи GPS. З використанням імітаційної моделі досліджена потенційна точність оцінок вектора стану нерухомого споживача при обробці вимірів методом фільтра Калмана. З використанням відомих моделей систематичних погрешностей виміру кодових псевдовідстаней і фазових псевдовідшвидкістей виконаний аналіз рівня цих погрешностей і відповідних зсувів в оцінках вектора стану споживача. Вихідні дані і результати моделювання приведені стосовно до умов В'єтнаму.*

**Ключові слова:** навігаційна супутникова система, вектор стану, нерухомий споживач, кодова псевдодальність, фазова псевдоскорість, фільтр Калмана.

## IMITATION DESIGN OF SATELLITE SYSTEM OF VECTOR ESTIMATION OF THE STATE OF IMMOBILE USER

E.N. Homiyakov, V.N. Medvedev, Le Tkhan' Tung

*The problem of fixed user's state vector estimation with usage of signals of navigational space vehicles of a global navigational satellite system GPS is reviewed. With usage of a simulation model the potential accuracy of estimations of fixed user's state vector is studied at processing of measurements by a method of a Kalman filter. With usage of known models of code pseudo-ranges and phase pseudo-ranges rates measurement fixed errors the analysis of a level of these inaccuracies have made. The input dates and outcomes of simulation are adduced with reference to conditions of Vietnam.*

**Keywords:** a navigational satellite system, state vector, fixed customer, code pseudo-distance, phase pseudo-speed, Kalman filter.