

УДК 621.396.98:629.7

**Б. И. Макаренко<sup>1</sup>, Е. Э. Наумова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>АТ Науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань, Харків

<sup>2</sup>Науковий метрологічний центр (військових еталонів) Міністерства оборони України, Харків

**Высокоточная синхронизация шкал времени при использовании двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей в аппаратуре потребителей глобальных навигационных спутниковых систем**

---

Приводяться результати розв'язування задачі порівняння шкал часу користувачів з системною шкалою часу глобальної навігаційної супутникової системи і задачі порівняння шкал часу двох просторово рознесених користувачів. Використовується подвійна диференціальна корекція псевдодальностей на основі обробки вимірювальної інформації в радіоелектронному комплексі з чотирьох регіональних контрольних станцій. Методом імітаційного моделювання радіоелектронного комплексу контрольних станцій, розміщених в Україні, аналізуються повні і залишкові похибки вимірювань псевдодальностей. Методом імітаційного моделювання супутникової системи координатно-часового забезпечення нерухомих користувачів аналізуються повні, потенційні та результуючі похибки порівняння шкал часу без застосування та з урахуванням застосування подвійної диференціальної корекції псевдодальностей.

---

**ВВЕДЕНИЕ**

Высокоточная синхронизация шкал времени пространственно разнесенных эталонов времени и частоты является одним из специальных применений глобальных спутниковых радионавигационных систем (СРНС) ГЛОНАСС, GNSS-I [1, 2, 4].

Опыт практического использования данных систем убедительно указывает на большую роль систематических (медленно изменяющихся) погрешностей в измерениях псевдодальностей и псевдоскоростей. Известно, что основными источниками данных погрешностей являются: тропосферная рефракция, ионосферная рефракция, неопределенность вектора состояния навигационных космических аппаратов (НКА).

Полагается, что эффекты, вытекающие из специальной и общей теории относительности, ослабляются с использованием аппаратных и программных средств [2].

Для ослабления медленно изменяющихся погрешностей в измерениях псевдодальностей и псевдоскоростей используют различные методы. Прежде всего применяют математические модели для

основных составляющих погрешностей, для использования которых необходимо знание ряда параметров обстановки (температура, давление, влажность, максимальная электронная концентрация и т. д.). Кроме того, широко используются относительные (разностные) измерения и определения. Именно таким методом в настоящее время осуществляется сравнение шкал времени UTC(SU) и UTC(UA) на основе наблюдения одного навигационного космического аппарата (НКА) ГЛОНАСС и определения расхождений шкал времени с использованием аппаратуры потребителя А-724М-01 [1].

Однако по мере удаления потребителей друг от друга эффект ослабления медленно изменяющихся погрешностей снижается из-за их пространственной декорреляции.

Наиболее эффективным средством ослабления медленно изменяющихся погрешностей измерения псевдодальностей и псевдоскоростей является дифференциальный режим функционирования спутниковой радионавигационной системы [1, 4]. При локальной дифференциальной коррекции медленно изменяющиеся погрешности устраняются практически полностью. По мере удаления потребителей от

контрольных станций остаточные погрешности растут по причине пространственно-временной декорреляции погрешностей.

В последнее время внимание специалистов привлекает идея среднечастотной коррекции псевдодалейностей [6].

Представляет интерес исследовать эффективность метода среднечастотной коррекции псевдодалейностей, названного в работе [3] методом двойной дифференциальной коррекции псевдодалейностей, применительно к задаче сравнения шкал времени потребителей, неподвижных в сеансе связи с НКА, координаты которых в общем случае неподвижны и подлежат оцениванию.

**СОВМЕСТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ КООРДИНАТ И ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ РАСХОЖДЕНИЙ НЕПОДВИЖНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

Вектор состояния неподвижного потребителя, следуя [4], определим векторно-матричным разностным уравнением

$$\lambda_{k_i} = \Phi_{k, k-1_i} \cdot \lambda_{k-1_i} + \eta_{k_i}, \quad (1)$$

где

$$\lambda_{k_i}^T = \{x_i, y_i, z_i; \delta T_{k_i}, \delta f_{k_i}\},$$

$x_i, y_i, z_i$  — гринвичские геоцентрические координаты антенны аппаратуры потребителя с номером  $i$ ;  $\delta T_{k_i}$  — расхождение (погрешность) шкалы времени потребителя относительно системного времени СРНС;  $\delta f_{k_i}$  — расхождение (погрешность) частоты генератора потребителя относительно номинального значения  $f_0$ ;

$$\Phi_{k, k-1_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{1-\rho_i}{\alpha_i \cdot f_0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_i \end{bmatrix},$$

$$\rho_i = e^{-\alpha_i(t_k - t_{k-1})} = e^{-\alpha_i \Delta t};$$

$\alpha_i$  — ширина энергетического спектра частотных флюктуаций.

Дискретный белый шум  $\eta_{k_i}$  имеет нулевое математическое ожидание. Дисперсионно-ковариационная матрица  $\langle \eta_{k_i} \cdot \eta_{k_i}^T \rangle = \theta_{\eta_i}$  содержит нули, кроме элементов  $\theta_{44_i}, \theta_{55_i}, \theta_{45_i} = \theta_{54_i}$ , а именно:

$$\theta_{44_i} = \sigma_{\delta f_i}^2 \frac{2\alpha_i \Delta t + 4\rho_i - \rho_i^2 - 3}{\alpha_i^2 f_0^2},$$

$$\theta_{55_i} = \sigma_{\delta f_i}^2 (1 - \rho_i^2),$$

$$\theta_{45_i} = \theta_{54_i} = \sigma_{\delta f_i}^2 \frac{(1 - \rho_i)^2}{\alpha_i f_0},$$

$$\sigma_{\delta f_i}^2 = \frac{\theta_{\xi_{f_i}}}{4\alpha_i},$$

$\theta_{\xi_{f_i}}$  — спектральная плотность интенсивности белого шума  $\xi_{f_i}(t)$  в уравнении

$$\frac{d\delta f_i(t)}{dt} = -\alpha_i \delta f_i(t) + \xi_{f_i}(t).$$

В качестве начальных условий для уравнения (1) имеем

$$\langle \lambda_{0_i}^T \rangle = \{x_{0_i}, y_{0_i}, z_{0_i}; \delta T_{0_i}, \delta f_{0_i}\} = \mathbf{v}_0^T,$$

$$\overset{\circ}{\lambda}_{0_i} = \lambda_{0_i} - \langle \lambda_{0_i} \rangle;$$

$$\langle \overset{\circ}{\lambda}_{0_i} \cdot \overset{\circ}{\lambda}_{0_i}^T \rangle = \mathbf{M}_0.$$

В качестве измеряемых функций рассмотрим кодовые псевдодалейности, а также псевдоскорости относительно четырех НКА рабочего созвездия. Уравнения наблюдения запишем в виде [4]

$$\mathbf{u}_{k_i} = \mathbf{R}_{k_i}(\lambda_{k_i}, \lambda_{sk}) + \mathbf{n}_{k_i},$$

где  $\hat{\lambda}_{sk}$  — блочный вектор оценок эфемерид и частотно-временных расхождений НКА,

$$\langle \mathbf{n}_{k_i} \rangle = \delta \mathbf{n}_{k_i}, \quad \overset{\circ}{\mathbf{n}}_{k_i} = \mathbf{n}_{k_i} - \delta \mathbf{n}_{k_i},$$

$$\langle \overset{\circ}{\mathbf{n}}_{k_i} \cdot \overset{\circ}{\mathbf{n}}_{k_i}^T \rangle = \mathbf{N}_{k_i}, \quad \langle \overset{\circ}{\mathbf{n}}_{k_i} \cdot \overset{\circ}{\mathbf{n}}_{l_i}^T \rangle = \mathbf{0} \quad \text{при } k \neq l.$$

Алгоритм оценивания вектора состояния потребителя имеет вид [4]

$$\tilde{\lambda}_{k_i} = \overset{*}{\lambda}_{k_i} + \overset{*}{\mathbf{H}}_{k_i} [\mathbf{u}_{k_i} - \overset{*}{\mathbf{R}}_{k_i}(\overset{*}{\lambda}_{k_i}, \lambda_{sk}) - \delta \mathbf{n}_{k_i}]. \quad (2)$$

Здесь

$$\overset{*}{\lambda}_{k_i} = \Phi_{k, k-1_i} \tilde{\lambda}_{k-1, i},$$

$$\overset{*}{\mathbf{H}}_{k_i} = \tilde{\Sigma}_{k_i} \cdot \overset{*}{\mathbf{C}}_{k_i}^T \cdot \mathbf{N}_{k_i}^{-1}, \quad \overset{*}{\mathbf{C}}_{k_i} = \left. \frac{\partial \mathbf{R}_{k_i}}{\partial \lambda_{k_i}} \right|_{\overset{*}{\lambda}_{k_i}}.$$

$$\tilde{\Sigma}_{ki} = \left[ \Sigma_{ki}^{-1} + \mathbf{C}_{ki}^T \mathbf{N}_{ki} \mathbf{C}_{ki} \right]^{-1}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\Sigma}_{ki}^* &= \Phi_{k, k-1} \cdot \tilde{\Sigma}_{k-1} \cdot \Phi_{k, k-1}^T + \theta_{\eta_{ki}}, \\ \tilde{\lambda}_{0_i} &= \nu_0, \\ \tilde{\Sigma}_{0_i} &= \mathbf{M}_0. \end{aligned}$$

Слагаемое  $\delta \mathbf{n}_{ki}$  в (2) указывает на возможность и целесообразность коррекции систематических погрешностей исходных измерений.

#### МЕТОД ДВОЙНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ ПСЕВДОДАЛЬНОСТЕЙ

Алгоритмы обработки измерительной информации в радиоэлектронном комплексе двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей приведены в [3]. При использовании комплекса из четырех региональных контрольных станций и аппроксимации поля медленно изменяющихся погрешностей измерения псевдодальностей плоскостью оценивается вектор из коэффициентов  $a_j, b_j, c_j$  по разностям  $\Delta \delta \tilde{D}_{kji} = \delta \tilde{D}_{kji} - \delta \tilde{D}_{kj0}, i = 1, 2, 3, j$  — номер НКА.

На интервале постоянства во времени параметров  $a_j, b_j, c_j$  длительностью  $M \Delta t$  ( $k = 1, 2, \dots, M$ ) имеем

$$\begin{pmatrix} \hat{a}_j \\ \hat{b}_j \\ \hat{c}_j \end{pmatrix} = \left[ \sum_{k=1}^M \mathbf{D}^T \cdot \Delta \mathbf{N}^{-1} \cdot \mathbf{D} \right]^{-1} \sum_{k=1}^M \mathbf{D}^T \cdot \Delta \mathbf{N}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \delta D_{kj1} \\ \delta D_{kj2} \\ \delta D_{kj3} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \\ x_3 - x_0 & y_3 - y_0 & z_3 - z_0 \end{bmatrix};$$

$x_i, y_i, z_i$  — гринвичские координаты антенн контрольных станций ( $i = 0, 1, 2, 3$ ).

Вместо алгоритма (4) возможно рекуррентное оценивание параметров  $\hat{a}_j, \hat{b}_j, \hat{c}_j$  методом фильтрации Калмана.

Двойная дифференциальная коррекция псевдодальностей для НКА с номером  $i$  в точке с координатами  $x, y, z$  определяется выражением

$$\delta \tilde{D}_{kj} = \delta \tilde{D}_{kj0} + \hat{a}_{jk}(x - x_0) + \hat{b}_{jk}(y - y_0) + \hat{c}_{jk}(z - z_0),$$

причем  $\delta \tilde{D}_{kj0}$  — псевдодальномерная погрешность, измеренная на главной контрольной станции.

Дополнительное слагаемое

$$ddD_{kj} = \hat{a}_{jk}(x - x_0) + \hat{b}_{jk}(y - y_0) + \hat{c}_{jk}(z - z_0)$$

вычисляется с учетом знания координат потребителя, полученных в штатном режиме функционирования аппаратуры (без коррекции).

Эффективность метода двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей может быть оценена по уровню остаточной погрешности, например в пункте контроля качества корректирующей информации с координатами  $x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha$ , а именно

$$\begin{aligned} \Delta \delta \tilde{D}_{kja} &= \delta \hat{D}_{kja} - \\ &- [\delta \hat{D}_{kj0} + \hat{a}_{jk}(x_\alpha - x_0) + \hat{b}_{jk}(y_\alpha - y_0) + \hat{c}_{jk}(z_\alpha - z_0)]. \end{aligned} \quad (5)$$

#### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА РЕГИОНАЛЬНЫХ КОНТРОЛЬНЫХ СТАНЦИЙ И СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ШКАЛ ВРЕМЕНИ

Алгоритм моделирования включает несколько этапов.

На первом этапе моделирования осуществляется:

- планирование сеанса связи с НКА по данным альманаха параметров орбит, выбор рабочего созвездия НКА;
- расчет эфемерид в сеансе связи.

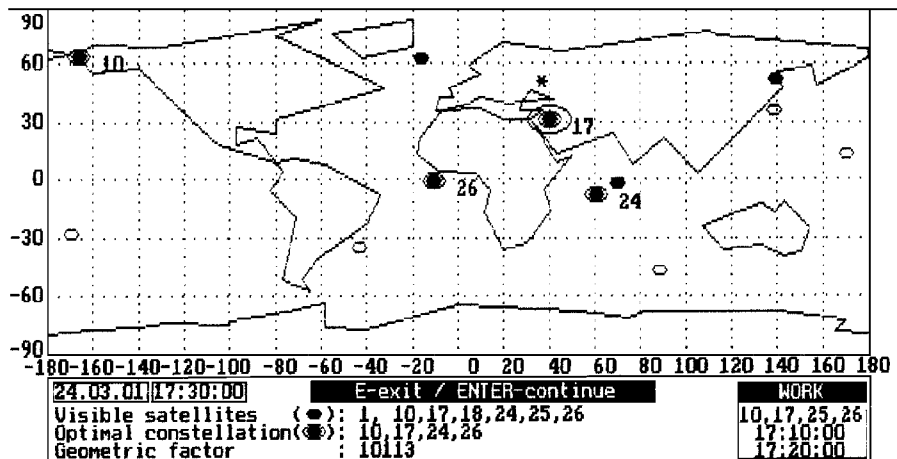
На втором этапе моделирования формируется массив наблюдаемых псевдодальностей и псевдоскоростей. При этом формируются процессы частотно-временных расхождений для каждой контрольной станции и для каждого пункта контроля качества корректирующей информации (ПКК КИ). С использованием вычисленных геометрических дальностей и радиальных скоростей, а также частотно-временных расхождений находятся измеряемые псевдодальности и псевдоскорости.

На основе известных моделей тропосферной и ионосферной рефракции вычисляются погрешности измерений псевдодальностей и псевдоскоростей. Полагая известными погрешности в знании векторов состояния НКА рабочего созвездия, вычисляются соответствующие погрешности псевдодальномерных и псевдоскоростных измерений

$$\delta \hat{\mathbf{R}}_k = \frac{\partial \mathbf{R}_k}{\partial \lambda_{sk}} \Big|_{\hat{\lambda}_{sk}} \delta \lambda_{sk}.$$

• Наконец, формируются случайные погрешности  $\mathbf{n}_k$  с заданной дисперсионной матрицей  $\mathbf{N}_k$ .

На третьем этапе находятся оценки параметров  $\hat{a}_j, \hat{b}_j, \hat{c}_j$  двойной дифференциальной коррекции



Карта навигационной обстановки

псевдодалностей для каждого НКА рабочего созвездия при выбранной дислокации контрольных станций. В пунктах контроля качества корректирующей информации находятся остаточные погрешности (5) для каждого НКА.

На последнем этапе оценивается вектор состояния потребителя (пункта контроля качества корректирующей информации) без коррекции и с использованием двойной дифференциальной коррекции псевдодалностей. Помимо абсолютных оценок векторов  $\lambda_{k\alpha}$ ,  $\lambda_{k\beta}$  определяются разностные оценки, т. е., вычисляются оценки длин базовых линий и расхождения шкал времени

$$\delta\tilde{T}_{k\alpha} - \delta\tilde{T}_{k\beta} = \delta\tilde{T}_{k\alpha\beta}.$$

**ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСШИРЕННОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ШКАЛ ВРЕМЕНИ ЭТАЛОНОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ С НЕИЗВЕСТНЫМИ КООРДИНАТАМИ**

Сеанс связи выбран на 24 марта 2001 г. Планирование сеанса проведено с использованием приведенного в табл. 1 альманаха параметров орбит НКА ГЛОНАСС с учетом параметров орбит двух КА INMARSAT-III (IOR, AOR-E).

Комплекс региональных контрольных станций выбран с учетом расположения главной станции в районе г. Симферополь (ГКС-0), где имеется передатчик длинноволнового диапазона системы даль-

ней радионавигации «Чайка», который можно использовать для трансляции корректирующей информации. Периферийные контрольные станции выбраны в районах городов Харьков, Алчевск, Хмельницкий. Пункты контроля качества корректирующей информации выбраны в г. Харьков и в г. Киев. Для рассмотренного комплекса в сеансе связи выбраны НКА ГЛОНАСС с номерами 17, 18, 24 и один геостационарный КА INMARSAT-III (IOR).

Рассмотрим сеанс связи длительностью 120 с. Интервал по времени записи измерительной информации выбран равным 2 с. Карта навигационной обстановки для этого сеанса приведена на рисунке.

В табл. 2 приведены оценки параметров вектора двойной дифференциальной коррекции псевдодалностей для всех НКА рабочего созвездия. В табл. 3, 4 приведены фрагменты файлов данных для пунктов контроля качества корректирующей информации в районе городов Киев и Харьков для КА № 26 (INMARSAT-III AOR-E).

Аналогичные вычисления выполнены также для НКА ГЛОНАСС с номерами 17, 18, 24 как для ПКК КИ в г. Киеве, так и в г. Харькове.

Основные результаты моделирования приведены в табл. 5, 6. Табл. 5 содержит результаты анализа погрешностей оценок расхождений шкал времени без применения двойной дифференциальной коррекции псевдодалностей. В табл. 6 помещены аналогичные данные, но для случая использования двойной дифференциальной коррекции псевдодалностей.

Таблица 1. Альманах параметров орбит НКА ГЛОНАСС и КА INMARSAT-III на 24 марта 2001 г.

№	$t_{Om}$	$T$	$e$	$i$	$Om$	$arg$	$Tv$
1	16858.498	40544.330	0.00139808	65 07 17.0	178 00 42.5	066 42 12.5	-0.00036620
7	06473.280	40544.194	0.00048160	65 07 41.1	221 23 28.8	079 01 08.9	-0.00042724
8	11601.092	40544.242	0.00144766	65 06 54.1	199 58 48.0	052 33 30.9	-0.00036620
10	19862.592	40543.874	0.00161552	64 52 58.0	286 25 25.9	177 24 45.7	+0.00042724
11	24752.374	40543.972	0.00313568	64 52 25.2	265 58 25.2	164 35 49.8	+0.00042724
13	35251.842	40543.914	0.00150584	64 52 29.5	222 01 25.4	323 13 23.7	+0.00048828
15	04739.998	40543.904	0.00039958	64 52 21.5	349 29 29.0	222 21 47.8	+0.00036620
17	13193.812	40543.962	0.00073814	64 44 53.5	073 39 04.7	066 31 39.7	+0.00042724
18	18155.186	40544.190	0.00354194	64 43 53.5	052 52 32.9	229 47 24.1	+0.00109862
24	08222.906	40543.938	0.00040816	64 45 06.4	094 24 41.4	067 47 08.3	+0.00054930
25	10000.000	86164.000	0.00001212	01 00 00.0	065 00 00.0	040 00 00.0	+0.00000012
26	12000.000	86164.000	0.00000134	01 00 00.0	345 00 00.0	050 00 00.0	+0.00000002

Таблица 2. Оценки параметров вектора двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей

НКА	$\hat{a}$	$\sigma_a$	$\hat{b}$	$\sigma_b$	$\hat{c}$	$\sigma_c$
17	$7.73 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$-4.69 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-10}$	$2.27 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-8}$
18	$-1.7 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$-5.87 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{-10}$	$-3 \cdot 10^{-6}$	$5.4 \cdot 10^{-8}$
24	$2.17 \cdot 10^{-5}$	$9.7 \cdot 10^{-8}$	$-5.6 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$4.47 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-7}$
26	$-1.7 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$-2.87 \cdot 10^{-8}$	$1.2 \cdot 10^{-9}$	$-3.12 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-8}$

Таблица 3. Эффективность двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей (ПКК КИ — Киев, НКА № 26 INMARSAT-III AOR-E)

Номер	$t_k$	$dU_0$	$ddD$	$dU_0+ddD$	$dU_{14}$	$dU_{14}-(dU_0+ddD)$	$dU_{14}-dU_0$
1	17:30:00	30.771	0.722	31.493	32.038	0.545	1.267
2	17:30:02	30.351	1.368	31.719	32.274	0.555	1.923
3	17:30:04	30.487	1.644	32.131	32.123	-0.008	1.636
4	17:30:06	30.565	1.574	32.139	32.344	0.205	1.779
5	17:30:08	30.266	1.695	31.961	32.099	0.138	1.833
6	17:30:10	30.621	1.797	32.418	32.103	-0.315	1.482
7	17:30:12	30.497	1.783	32.28	32.189	0.091	1.692
8	17:30:14	30.469	1.767	32.236	32.292	0.056	1.823
9	17:30:16	30.134	1.812	31.946	32.182	0.236	2.048
10	17:30:18	30.393	1.847	32.24	32.383	0.143	1.99
::	::::	::::	::::	::::	::::	::::	::::
57	17:31:52	30.501	1.815	32.316	32.235	-0.081	1.734
58	17:31:54	30.51	1.813	32.323	32.264	-0.059	1.754
59	17:31:56	30.477	1.812	32.289	32.284	-0.005	1.807
	MO					-0.00175	1.795525
	SKO					0.163574	0.147202

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы сводятся к следующему.

Без коррекции погрешность измерения псевдодальностей имеет порядок десятков метров ( $dU_{14}$  в табл. 3,  $dU_{10}$  в табл. 4).

Коррекция по данным главной контрольной станции приводит к остаточной погрешности измерения псевдодальностей на уровне единиц метров ( $dU_{14} - dU_0$  в табл. 3;  $dU_{10} - dU_0$  в табл. 4).

Двойная дифференциальная коррекция псевдодальностей по данным комплекса из четырех региональных контрольных станций обеспечивает остаточную погрешность на дециметровом уровне ( $dU_{14} - dU_0 - ddD$  в табл. 3;  $dU_{10} - dU_0 - ddD$  в табл. 4).

Без дифференциальной коррекции псевдодальностей смещения в оценках расхождения шкал времени равны 140—170 нс ( $dT_{10}$ ,  $dT_{14}$  в табл. 5), тогда как потенциальная точность находится на уровне

Таблица 4. Эффективность двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей (ПКК КИ — Харьков, НКА № 26 INMARSAT-III AOR-E)

Номер	$t_k$	$dU_0$	$ddD$	$dU_0+ddD$	$dU_{10}$	$dU_{10}-(dU_0+ddD)$	$dU_{10}-dU_0$
1	17:30:00	30.771	5.747	36.518	36.191	-0.327	5.420
2	17:30:02	30.351	5.978	36.329	36.198	-0.131	5.847
3	17:30:04	30.487	5.970	36.457	35.917	-0.54	5.430
4	17:30:06	30.565	5.975	36.540	36.111	-0.429	5.546
5	17:30:08	30.266	5.953	36.219	35.528	-0.691	5.262
6	17:30:10	30.621	5.882	36.503	35.895	-0.608	5.274
7	17:30:12	30.497	5.898	36.395	35.905	-0.49	5.408
8	17:30:14	30.469	5.876	36.345	35.645	-0.7	5.176
9	17:30:16	30.134	5.919	36.053	36.199	0.146	6.065
10	17:30:18	30.393	5.903	36.296	35.84	-0.456	5.447
...	....	....	....	....	...	.....	....
57	17:31:52	30.501	6.085	36.586	36.040	0.546	5.539
58	17:31:54	30.510	6.086	36.596	36.024	-0.572	5.514
59	17:31:56	30.477	6.087	36.564	36.064	-0.5	5.587
				MO		-0.43215	5.588305
				SKO		0.166524	0.151659

Таблица 5. Калмановские оценки расхождения шкал времени потребителей в районах г. Киев (ПКК КИ — 14) и г. Харьков (ПКК КИ — 10) без применения двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей, измеренных по НКА ГЛОНАСС

	$t_k$	$dt_{10}$	$skot_{10}$	$dt_{14}$	$skot_{14}$	$dt_{14-10}$
1	17:30:02	8.13E-08	9.80E-10	9.17E-08	9.80E-10	1.04E-08
2	17:30:04	1.12E-07	8.10E-10	1.26E-07	8.10E-10	1.39E-08
3	17:30:06	1.24E-07	7.10E-10	1.41E-07	7.10E-10	1.71E-08
4	17:30:08	1.28E-07	6.50E-10	1.48E-07	6.40E-10	2.02E-08
5	17:30:10	1.30E-07	6.00E-10	1.52E-07	5.90E-10	2.14E-08
6	17:30:12	1.32E-07	5.60E-10	1.54E-07	5.60E-10	2.22E-08
7	17:30:14	1.32E-07	5.30E-10	1.55E-07	5.30E-10	2.24E-08
8	17:30:16	1.33E-07	5.10E-10	1.56E-07	5.00E-10	2.29E-08
9	17:30:18	1.34E-07	4.90E-10	1.57E-07	4.80E-10	2.29E-08
10	17:30:20	1.34E-07	4.80E-10	1.57E-07	4.70E-10	2.36E-08
	....	....	....	....	....	....
57	17:31:54	1.41E-07	3.10E-10	1.67E-07	3.00E-10	2.60E-08
58	17:31:56	1.41E-07	3.10E-10	1.67E-07	3.00E-10	2.67E-08
59	17:31:58	1.41E-07	3.10E-10	1.67E-07	3.00E-10	2.66E-08
		MO		1.60E-07		2.41E-08
		SKO		1.12E-08		2.80E-09

Таблица 6. То же после применения двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей, измеренных по НКА ГЛОНАСС

	$t_k$	$dT_{10c}$	$skot_{10c}$	$dT_{14c}$	$skot_{14c}$	$dt_{14-10c}$
1	17:30:02	8.30E-10	9.80E-10	7.00E-10	9.80E-10	-1.30E-10
2	17:30:04	1.00E-09	8.10E-10	2.70E-10	8.10E-10	-7.30E-10
3	17:30:06	2.40E-10	7.10E-10	6.30E-10	7.10E-10	3.90E-10
4	17:30:08	9.70E-11	6.40E-10	6.70E-10	6.40E-10	5.73E-10
5	17:30:10	1.70E-10	6.00E-10	1.90E-10	5.90E-10	2.00E-11
6	17:30:12	1.30E-10	5.60E-10	1.40E-10	5.60E-10	1.00E-11
7	17:30:14	2.40E-10	5.30E-10	2.50E-12	5.30E-10	-2.38E-10
8	17:30:16	1.90E-10	5.10E-10	2.50E-11	5.00E-10	-1.65E-10
9	17:30:18	1.20E-10	4.90E-10	1.00E-10	4.80E-10	-2.00E-11
10	17:30:20	4.50E-10	4.70E-10	1.60E-11	4.70E-10	-4.34E-10
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
57	17:31:54	8.80E-11	3.00E-10	3.30E-10	3.00E-10	2.42E-10
58	17:31:56	3.20E-10	3.00E-10	2.70E-11	3.00E-10	-2.93E-10
59	17:31:58	4.00E-10	3.00E-10	5.60E-11	3.00E-10	-3.44E-10
		MO		1.73E-10		-1.12E-10
		SKO		1.69E-10		2.84E-10

долей наносекунды ( $sko t_{10}$ ,  $sko t_{14}$ ). Смещения в оценках расхождений двух шкал времени порядка десятков наносекунд ( $dt_{14-10}$  в табл. 5).

При использовании двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей полные погрешности как абсолютных, так и относительных (разностей) оценок расхождений шкал времени находятся на уровне потенциальных значений и фактически не превышают одной наносекунды.

В целом следует заметить, что результаты моделирования, вероятно, излишне оптимистичны, однако достаточно убедительно свидетельствуют об эффективности двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей. Сходные результаты получены и для других сеансов связи, для других конфигураций комплексов контрольных станций как в Украине, так и за ее пределами.

1. Величко О. М., Сафронов Ю. І., Клейман О.С. та ін. Державна служба єдиного часу і еталонних частот України: структура і основні засади забезпечення країни високоточною частотно-часовою інформацією // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 2/3.—С. 8—11.
2. Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенегер Г., Коллінз Д. Глобальна система визначення местоположення (GPS): Теорія і практика / Пер. з англ. під ред. Я. С. Яцківа. — К.: Наук. думка, 1995.—380 с.
3. Наумова О. Е., Романько В. М., Хомяков Е. М., Черепков С. Т. Метод подвійної диференціальної корекції // Український метрологічний журн.—1999.—№ 3.—С. 8—10.

4. Хомяков Э. Н., Наумова Е. Э., Шаповалов С. Г., Трикоз Д. В. Спутниковые системы координатно-временного обеспечения неподвижных потребителей. — Харьков: ХАИ, 2000.—105 с.
5. NAVSTAR GPS. User Equipment. Introduction. — 1996, September. Chapter 11. Special application for NAVSTAR GPS. — P. 11\_1—11\_15.
6. Xing-Xiang Jin, Cees D. de Jong. Improvement of DGPS Performance in Medium Areas by Using a Network of DGPS Reference Stations. Differential Satellite Navigation System // Proc. 5<sup>th</sup> International Conf. on DSRNS'96. — St. Petersburg (Russia), 1996, May 20—24.

---

#### TIME SCALES HIGH-PRECISION SYNCHRONIZATION FOR USE OF PSEUDORANGES DOUBLE DIFFERENTIAL CORRECTION IN USERS APPARATUS OF GPS

B. I. Makarenko, E. E. Naumova

The problem of a comparison of users time scales with a system time scale of GPS and problem of a comparison of time scales two spatially of diverse users is considered. The double differential correction of pseudoranges based on measuring information processing in a radioelectronic complex from four regional control stations is offered. Full and residual errors of pseudoranges measurement are analysed by the simulation modeling method of a radio electronic complex of control stations located in Ukraine. Full, potential and resultant errors of time scales comparison without application and with allowance for applications of pseudoranges double differential correction are analysed by the simulation modeling method of fixed user coordinate-time providing.