

УДК 528.2:629.78

А.И. ГОРЬ, В.Н. МЕДВЕДЕВ, Е.Э. НАУМОВА, Э.Н. ХОМЯКОВ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»***РЕГИОНАЛЬНАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВОЙНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ ПСЕВДОДАЛЬНОСТЕЙ**

Рассмотрена региональная система оценивания вектора состояния неподвижного потребителя с использованием радиоэлектронного комплекса контрольных станций и технологии двойной дифференциальной коррекции высокоточных кодовых измерений псевдодалностей. Приведены результаты математического моделирования системы применительно к ее использованию в Харьковской области.

глобальные навигационные спутниковые системы, имитационное моделирование, дифференциальная коррекция, коррекция псевдодалностей, сети контрольных станций, спутниковая навигация, спутниковая геодезия.

Введение

Дифференциальные навигационные подсистемы позволяют удовлетворять наиболее жесткие требования навигационного обеспечения. Одна из наиболее актуальных задач данной области – задача повышения точности координатно-временного обеспечения потребителей, как правило, решается на основе использования дифференциального режима функционирования глобальных спутниковых навигационных систем нового поколения. Стремление увеличить рабочую зону действия дифференциальных поправок привело к идее применения радиоэлектронных комплексов контрольных станций. По существу задача таких комплексов сводится к анализу и оценке параметров пространственно-временного поля погрешностей измерений. В простейшем случае имеются в виду измерения кодовых псевдодалностей.

Судя по публикациям, оригинальные разработки, так называемых, сетевых решений выполнены в ряде известных фирм, например, Trimble Navigation, Geo⁺⁺ и др., а также в ряде университетов, в частности, в Голландии, Канаде.

Основное внимание специалистов направлено на достижение сантиметрового уровня точности даже для кинематических применений в реальном мас-

штабе времени. Основным источником информации при этом являются двойные разности фазовых псевдодалностей.

Представляет интерес проанализировать точностные характеристики радиоэлектронного комплекса региональных контрольных станций, оснащенных сравнительно простыми одночастотными приемниками. Основным источником информации в данном случае является массив кодовых псевдодалностей с достаточно малыми флуктуационными погрешностями. Последнее достигается применением предварительной полиномиальной фильтрации, использованием фазовых измерений для сглаживания кодовых псевдодалностей.

Крайне важно при этом максимально ослабить эффект многолучевого распространения сигналов использованием специальных антенных конструкций.

Опираясь на идею среднечастотной дифференциальной коррекции псевдодалностей, высказанную в работе [1], были разработаны алгоритмы оценки параметров пространственного поля погрешностей измерения псевдодалностей при использовании трехмерной линейной [2] и квадратичной [3] аппроксимации данного поля.

Применение этих параметров в аппаратуре потребителей сводилось к расчету дополнительных поправок к измеряемым псевдодалностям, которые

складывались с поправками, формируемыми на главной контрольной станции комплекса. По существу псевдодальности корректируются дважды, что и объясняет название метода в заголовке статьи.

Имитационное моделирование комплекса выполнено ранее для сравнительно больших регионов, например, для территории Украины, Мексики, Индии, Египта. Остаточные погрешности в измерениях псевдодальностей оказывались на дециметровом уровне. Это обеспечивало субметровый уровень точности в оценках координат и наносекундный уровень точности в оценках расхождения шкал времени.

Цель данного исследования заключается в анализе возможностей комплекса контрольных станций и технологии двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей для сравнительно небольшого по площади региона, в частности, для Харьковской области.

1. Структура имитационной модели региональной системы координатно-временного обеспечения потребителей, краткая характеристика ее элементов

Структура имитационной модели содержит (рис. 1):

- модуль ввода исходных данных о дислокации средств комплекса;
- модуль анализа навигационной обстановки;
- модуль расчета медленноменяющихся погрешностей измерения псевдодальностей и псевдоскоростей;
- модуль расчета измеряемых и наблюдаемых псевдодальностей и псевдоскоростей с учетом случайных погрешностей измерений и динамики поведения шкал времени в аппаратуре контрольных станций и в аппаратуре потребителей;
- модуль оценки векторов состояния региональных контрольных станций (РКС) и неподвижных потребителей – пунктов контроля качества корректирующей информации (ПКК КИ);
- модуль оценки параметров пространственного поля погрешностей измерения псевдодальностей;
- модуль расчета остаточных погрешностей в измерениях псевдодальностей после одиночной и двойной коррекции;
- модуль оценки вектора состояния неподвижного потребителя (пункта контроля качества корректирующей информации) с учетом двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей;



Рис. 1. Структура программы имитационного моделирования региональной системы

– модуль расчета базовых расстояний, частотно-временных расхождений между главным и периферийными пунктами контроля качества корректирующей информации.

Модуль ввода данных о дислокации средств комплекса, а именно региональных контрольных станций (РКС), пунктов контроля качества корректирующей информации (ПКККИ) использует геодезические координаты антенн в системе WGS-84.

Модуль анализа навигационной обстановки для заданной дислокации контрольных станций и пунктов контроля качества корректирующей информации, заданной календарной даты, времени начала и окончания сеанса обеспечивает вычисление эфемерид (координат и составляющих вектора скорости в системе WGS-84) НКА GPS с заданной дискретностью по времени. При этом имеется возможность выбора четырех рабочих навигационных космических аппаратов (НКА) и сохранить файл их эфемерид. Для анализа навигационной обстановки и расчета эфемерид НКА используется альманах параметров орбит.

Модуль расчета медленноменяющихся погрешностей измерения псевдодальностей и псевдоскоростей обеспечивает вычисление погрешностей, обусловленных тропосферной и ионосферной рефракцией, а также неопределенностью в знании векторов состояния НКА. Исходные данные предусматривают наличие параметров обстановки, используемых в принятых моделях высотного профиля показателя преломления в тропосфере и в ионосфере.

При формировании измеряемых псевдодальностей и псевдоскоростей особое внимание уделяют динамике частотно-временных расхождений [2]. Формирование наблюдаемых псевдодальностей и псевдоскоростей учитывает также наличие случайных погрешностей с заданными статистическими характеристиками.

Оценка вектора состояния РКС и ПКККИ осуществляется фильтром Калмана. Оцениваются три

координаты, смещение шкалы времени и смещение частоты опорного генератора по четырем псевдодальностям и четырем псевдоскоростям относительно рабочих НКА. Программа позволяет также оценивать только координаты приемника с использованием первых разностей по НКА псевдодальностей и псевдоскоростей.

Модуль оценки вектора состояния РКС и ПКККИ обеспечивает запись выходных данных, содержащих измеряемые функции, наблюдаемые функции, оценки вектора состояния, а также их погрешности.

Модуль оценки параметров поля погрешностей измерения псевдодальностей оперирует с данными контрольных станций, формирует разности суммарных псевдодальномерных погрешностей измерения псевдодальностей по контрольным станциям, находит искомые оценки пространственной ориентации плоскости погрешностей для каждого рабочего НКА. Данный модуль с учетом найденных оценок и данных о погрешностях измерения псевдодальностей в ПКККИ находит остаточные погрешности $d\Delta u_{kj\alpha}$ после двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей

$$d\Delta u_{kj\alpha} = \Delta u_{kj\alpha} - (\delta\tilde{D}_{kj\alpha} + \Delta\delta\tilde{D}_{kj\alpha}), \quad (1)$$

$$j = 1, 2, 3, 4; \quad \alpha = 4, 5, \dots, 9,$$

где $\Delta u_{kj\alpha} = u_{kj\alpha} - r_{kj\alpha}$ – полная погрешность измерения псевдодальности по НКА с номером j на ПКККИ с номером α в момент времени t_k ; $\delta\tilde{D}_{kj\alpha}$ – полная погрешность, вычисленная на главной контрольной станции (для одинарной коррекции псевдодальностей); $\Delta\delta\tilde{D}_{kj\alpha}$ – дополнительная коррекция псевдодальности для ПКККИ с номером α .

Дополнительная коррекция вычисляется как

$$\Delta\delta\tilde{D}_{kj\alpha} = \hat{a}_j(x_\alpha - x_0) + \hat{b}_j(y_\alpha - y_0) + \hat{c}_j(z_\alpha - z_0), \quad (2)$$

где $x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha$ – координаты ПКК КИ с номером α , x_0, y_0, z_0 – координаты главной РКС; $\hat{a}_j, \hat{b}_j, \hat{c}_j$ – оценки коэффициентов ориентации плоского поля погрешностей измерения псевдодальностей по НКА j , полученные по данным региональных контрольных станций.

Модуль оценки вектора состояния ПКК КИ с учетом двойной дифференциальной коррекции (ДДК) псевдодальностей позволяет оценить эффективность такой коррекции по результирующей погрешности оценок координат и частотно-временных расхождений.

Наконец, модуль расчета базовых расстояний и частотно-временных расхождений для выбранных пар ПКК КИ обеспечивает вычисление как с учетом коррекции псевдодальностей, так и без нее.

2. Исходные данные для имитационного моделирования региональной системы координатно-временного обеспечения потребителей

В табл. 1 представлена дислокация региональных контрольных станций и пунктов контроля качества корректирующей информации. Главная контрольная станция ($\alpha = 0$) выбрана в районе г. Купянска.

Таблица 1

Дислокация региональных контрольных станций и пунктов контроля качества

№ РКС, ПКК	Район	B	L	H, м
0	Купянск	49 ° 41'	37° 38'	210
1	Богодухов	50 ° 03'	35 ° 31'	220
2	Барвенково	48 ° 50'	37° 01'	180
3	Красноград	49 ° 33'	36 ° 23'	190
4	Харьков	50 ° 02'	36 ° 17'	200
5	Волчанск	50 ° 15'	36 ° 52'	210
6	ПКК №6	50 ° 12'	37 ° 49'	190
7	ПКК №7	49 ° 16'	37 ° 49'	200
8	ПКК №8	49 ° 16'	36 ° 40'	205
9	ПКК №9	48 ° 42'	36 ° 06'	210

Периферийные станции расположены в районах Богодухова ($\alpha = 1$), Барвенково ($\alpha = 2$) и Краснограде ($\alpha = 3$). Пункты контроля качества корректирующей информации выбраны в районах городов Харькова ($\alpha = 4$), Волчанска ($\alpha = 5$).

Кроме того, выбраны еще контрольные точки $\alpha = 6, 7, 8, 9$ в пределах области.

Сеанс связи выбран 23.07.2004 г. с 9:00:00 по 9:03:00 UTC с дискретностью $\Delta t = 2$ с при объеме выборки $M = 90$). Рабочие НКА GPS выбраны с номерами 1, 11, 7, 16. Их угловые параметры (азимут, угол возвышения над горизонтом) на момент

9:00:00 UTC приведены в табл. 2. Для планирования сеанса связи и расчета эфемерид НКА GPS использован альманах параметров орбит от 18.07.2004 г., полученный с использованием приемника ACE III (Trimble Navigation).

Для расчета медленноменяющихся погрешностей измерения псевдодальностей и псевдоскоростей кроме файла с координатами РКС и ПКК КИ, файла с эфемеридами рабочих НКА использовался файл с параметрами обстановки, содержание которого приведено в табл. 3. Здесь приведены параметры метеобстановки (давление воздуха в Па, темпе-

ратура в градусах Цельсия, относительная влажность в (%), параметры модели высотного профиля показателя приложения в ионосфере (h_1 , h_2 , N_{\max}), эффективная высота тропосферы, высота антенны приемника.

Таблица 2
Баллистическая обстановка

№ НКА	Азимут	Угол места
1	285° 01'	83° 16'
11	188° 52'	23° 32'
16	118° 22'	7° 07'
7	278° 27'	6° 14'

Кроме того, использовался файл с погрешностями в знании эфемерид и частотно-временных расхождений рабочих НКА. Содержание этого файла приведено в табл. 4. При формировании измеряемых псевдодальностей поведение шкал времени моделировалось на основе модели частотных флуктуаций типа марковского процесса первого порядка при заданной ширине энергетического спектра и заданной величине дисперсии флуктуаций. Средне-квадратические погрешности измерения псевдодальностей полагались разными 0,3 м, а псевдоскоростей – 0,01 м/с.

Таблица 3
Параметры обстановки

№РКС,ПКК	Р, Па	Т, °С	НМ, %	Н ₁ , км	Н ₂ , км	N _{max} , 10 ¹¹ 1/м ³	Н _Т , км	Н ₀ , м
0	101300	18	60	325	225	5	7	210
1	101200	19	55	325	225	5	7	220
2	101150	17	63	325	225	5	7	180
3	101100	16	59	325	225	5	7	190
4	101050	18	58	325	225	5	7	200
5	101070	18	57	325	225	5	7	210
6	101035	19	56	325	225	5	7	190
7	101045	19	55	325	225	5	7	200
8	101024	20	57	325	225	5	7	205
9	101010	21	59	325	225	5	7	210

Таблица 4
Погрешности в знании эфемерид

№ НКА	Δx , м	Δy , м	Δz , м	ΔV_x , см/с	ΔV_y , см/с	ΔV_z , см/с	$\Delta \delta t$, нс	$\Delta \delta f$, Гц
1	2	2	54	2,5	1,5	3,5	20	0,2
11	3	3	1,9	4,5	3,5	2,5	16	0,1
7	5	3,2	1,6	2	1,5	1,5	10	0,4
16	4,5	3,4	2,5	3,8	3,6	4,5	12	0,5

3. Основные результаты моделирования

Применительно к исходным данным медленно-меняющиеся погрешности измерений псевдодальности вычислены в пределах сеанса связи для всех

региональных контрольных станций и всех пунктов контроля качества. В частности, для пункта (4) в Харькове в момент времени 9:03 UTC суммарная погрешность измерения псевдодальности оказалась равной 18,6 м для НКА №1 ($\beta = 85^\circ 33'$), 25,28 м для

НКА №11 ($\beta = 22^\circ$), 35,92 м для НКА №16 ($\beta = 7^\circ 13'$) и 36,37 м для НКА №7 ($\beta = 6,46^\circ$). За сеанс длительностью 3 минуты изменения данных погрешностей были порядка 2 см для зенитного НКА №1, 0,5 м для НКА №11 и порядка 2 м для НКА №№16 и 7.

При таких медленноменяющихся погрешностях измерения псевдодальностей полные погрешности оценок координат, в частности, в Харькове при $t = 9:03$ UTC оказались равными $\Delta x = 18,09$ м, $\Delta y = 9,22$ м, $\Delta z = 11,99$ м при среднеквадратических погрешностях $\sigma_x = 5$ см, $\sigma_y = 3$ см, $\sigma_z = 4$ см. Полная погрешность расхождения шкалы времени относительно GPSTime составляла 41 нс. при $\sigma_T = 0,08$ нс. Аналогичные данные получены для всех выбран-

ных станций и пунктов контроля в регионе. По данным обработки в комплексе из четырех региональных контрольных станций получены оценки параметров a, b, c ориентации плоскости поля погрешностей измерения псевдодальностей. Результаты приведены в табл. 5.

На основе полученных оценок найдены двойные дифференциальные поправки для каждого пункта контроля качества корректирующей информации и вычислены остаточные погрешности измерения псевдодальностей относительно каждого из четырех рабочих НКА. В табл. 6 приведены средние за сеанс остаточные погрешности (в метрах) после применения двойной коррекции псевдодальностей.

Таблица 5

Параметры аппроксимации пространственного поля погрешностей для рабочих НКА

№ НКА	$\hat{a} \cdot 10^{+5}$	$\sigma_a \cdot 10^{+5}$	$\hat{b} \cdot 10^{+5}$	$\sigma_b \cdot 10^{+5}$	$\hat{c} \cdot 10^{+5}$	$\sigma_c \cdot 10^{+5}$
1	-1,29	2,4	-0,84	1,8	-35,7	3,5
11	7,17	2,9	5,34	2,1	-11,05	4,2
7	-7,44	4,1	-7,57	3,1	11,0	6,1
16	-25,5	2,8	-16,3	2,1	-1,75	4,1

Таблица 6

Средние остаточные погрешности измерения псевдодальностей после ДДК

№ ПКК КИ	НКА 1	НКА 11	НКА 16	НКА 7
4	0,029	0,047	0,096	0,101
5	0,059	0,24	0,041	-0,17
6	-0,258	0,30	-0,037	-0,152
7	-0,099	0,069	0,096	-0,068
8	0,017	-0,125	0,081	0,26
9	0,131	-0,112	0,069	0,056

Для наглядности на рис. 2 – 5 приведены зависимости от времени данных остаточных погрешностей для ПКК КИ №4. Здесь же приведены остаточные погрешности измерения псевдодальностей, если используются одинарные коррекции по данным только главной контрольной станции.

После применения двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей полные погрешности оценок координат и частотно-временных расхождений значительно уменьшались. В табл. 7 приведены

значения этих погрешностей на момент времени $t = 9:03$ UTC. Для сравнения здесь же приведены погрешности без применения коррекций. В табл. 8 приведены полные погрешности оценок базовых расстояний между пунктами контроля качества корректирующей информации. Погрешности ΔL получены без каких-либо коррекций псевдодальностей, а погрешности $\Delta L_{\text{корр}}$ получены с учетом использования двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей.

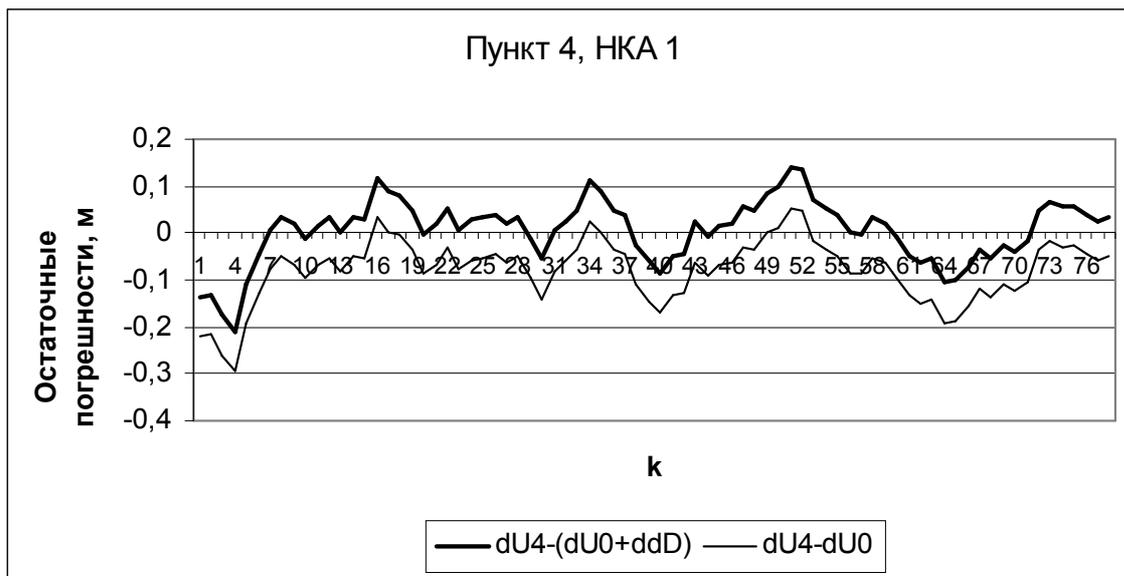


Рис. 2. Остаточные погрешности измерения псевдодальности в ПКК КИ №4 относительно НКА №1

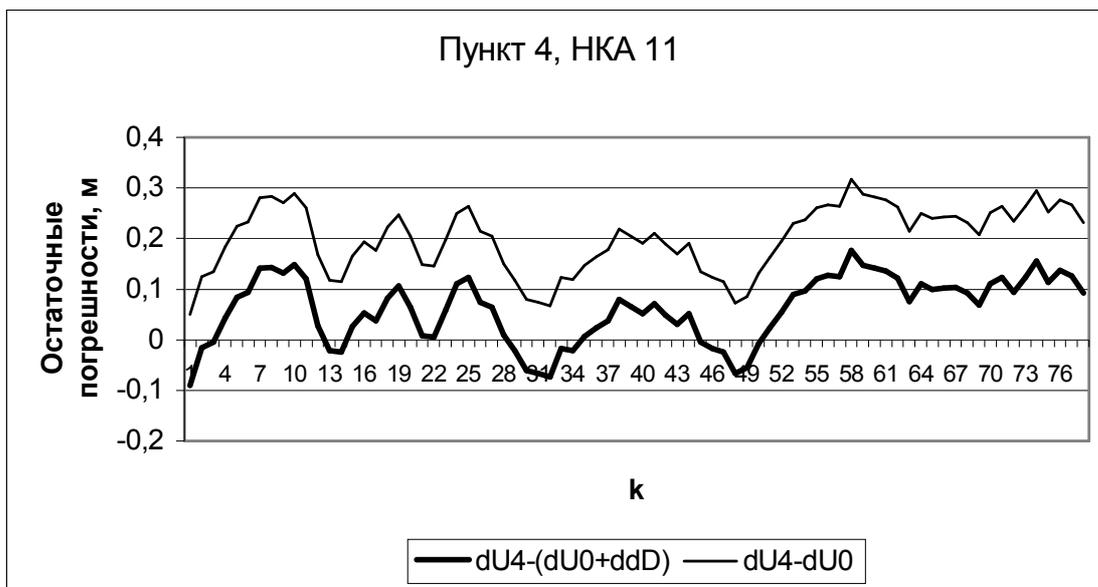


Рис. 3. Остаточные погрешности измерения псевдодальности в ПКК КИ №4 относительно НКА №11

Таблица 7

Полные погрешности оценок координат без и с применением ДДК

№ ПКК КИ	Δx , м	$\Delta x_{\text{корр}}$, м	Δy , м	$\Delta y_{\text{корр}}$, м	Δz , м	$\Delta z_{\text{корр}}$, м
4	18,09	-0,05	9,22	0,05	11,99	0,02
5	17,70	-0,03	9,72	-0,03	12,12	-0,03
6	17,24	-0,02	11,09	-0,01	12,26	-0,04
7	17,09	-0,01	11,56	-0,04	11,94	0,03
8	17,66	-0,01	10,1	0,07	11,71	0,02
9	17,92	0,02	9,69	-0,01	11,53	-0,01

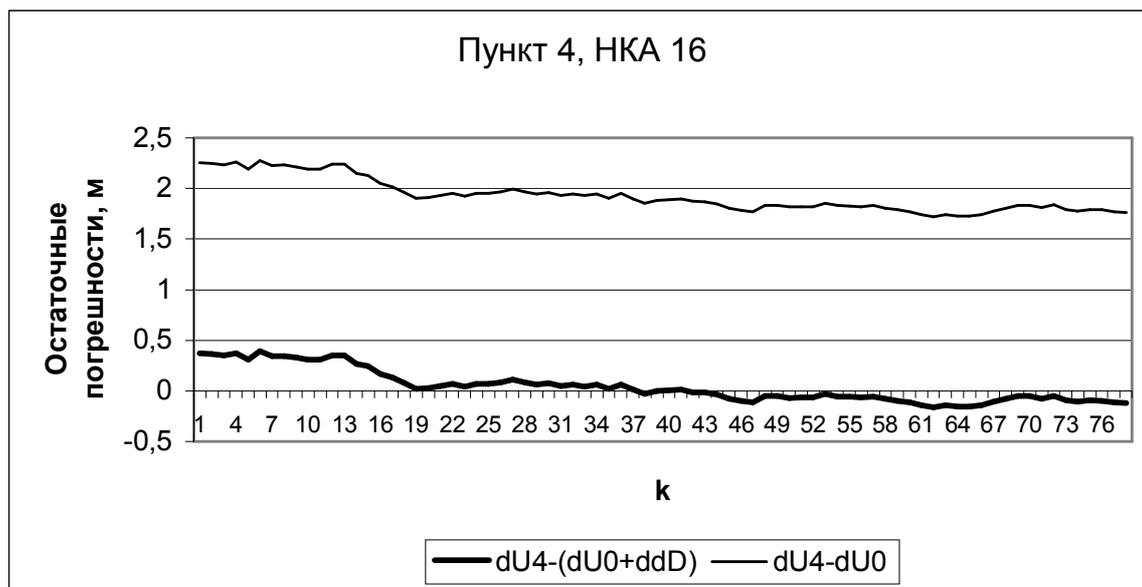


Рис. 4. Остаточные погрешности измерения псевдодальности в ПКК КИ №4 относительно НКА №16

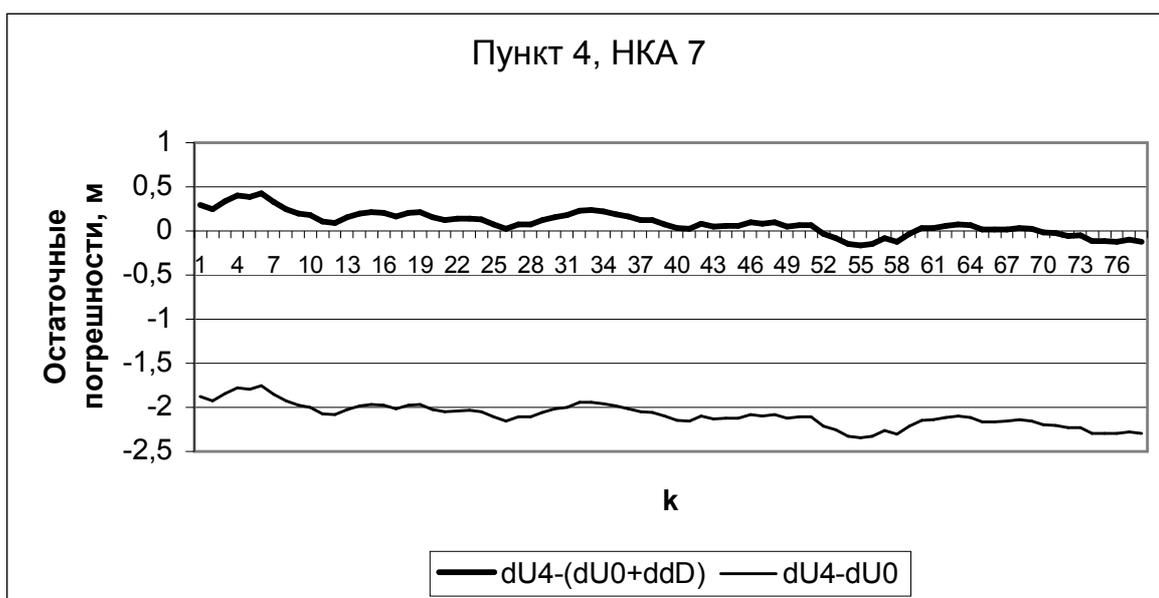


Рис. 5. Остаточные погрешности измерения псевдодальности в ПКК КИ №4 относительно НКА №7

Таблица 8

Погрешности оценки базовых линий без и с применением ДДК

Базовая линия	Длина базовой линии, м	Погрешность ΔL , м	Погрешность $\Delta L_{\text{корр}}$, м
L_{5-4}	47426	0,593	0,028
L_{6-4}	110432	1,975	0,072
L_{7-4}	139270	0,613	0,004
L_{8-4}	89733	0,38	0,01
L_{9-4}	149928	0,593	0,028

Заключение

Результаты имитационного моделирования региональной системы координатно-временного обеспечения потребителей с использованием двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей позволяют сделать ряд выводов.

Использование двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей существенно снижает остаточную погрешность измерения псевдодальностей особенно относительно НКА с малыми углами возвышения над горизонтом (рис. 4, 5).

Для зенитных НКА и для НКА со сравнительно большими углами возвышения над горизонтом эффективность двойной коррекции псевдодальностей меньше, но все равно имеет место уменьшение остаточной погрешности (рис. 2, 3)

Средние за сеанс остаточные погрешности измерения псевдодальностей по всем НКА для всех пунктов контроля качества корректирующей информации не превышают 0,3 м (табл. 6).

Применение двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей приводит к значительному улучшению точности определения координат. Полная погрешность оценок координат не превышает 8 см (табл. 7). Соответственно улучшается точность оценки длин базовых линий (табл. 8).

Исследования показали также увеличение точности при синхронизации шкал времени в регионе до единиц наносекунд.

Главной задачей ближайшего будущего является усложнение имитационной модели введением дополнительных источников погрешностей измерения

псевдодальностей и псевдоскоростей, в частности, учет многолучевости.

В перспективе главная задача заключается в экспериментальной проверке разработанных методик, алгоритмов и программного обеспечения в комплексе региональных контрольных станций Харьковского региона.

Литература

1. Xin-Xiang Jin, Gees D. De Jong, Improvement of DGPS Performance in Medium Areas by Using a Network of DGPS Reference Stations // Proc. 5th International Conference on DSRNS-96. – St.Petersburg, Russia. – May 20 – 24, 1996.

2. Пространственно-временная обработка измерительной информации в радиоэлектронном комплексе региональных контрольных станций спутниковых навигационных систем / Э.Н. Хомяков, Е.Э. Наумова, Д.В. Трикоз, С.Г. Шаповалов, А.В. Назаров, К.В. Иванюк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: ХАКУ. – 1999. – Вып. 12. – С. 19 – 22.

3. Хомяков Э.Н., Наумова Е.Э. Расширенная региональная дифференциальная коррекция псевдодальностей в глобальных навигационных спутниковых системах // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2003. – Т. 8, № 3. – С. 57 – 63.

Поступила в редакцию 05.11.2004

Рецензент: д-р физ.-мат. наук А.В. Прокопов, Национальный научный центр «Институт метрологии», Харьков.