

Двойная дифференциальная коррекция кодовых псевдодальностей, их разностей по навигационным космическим аппаратам в региональной системе координатно-временного обеспечения потребителей

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
Харьковский институт экономики и бизнеса*

Введение

Спутниковые радионавигационные системы GPS, ГЛОНАСС в настоящее время широко используются для решения задач управления движением транспортных средств, задач координатно-временного обеспечения потребителей.

Опыт практического применения таких систем убеждает в том, что их потенциальные точностные характеристики не достигаются из-за наличия систематических, медленноменяющихся погрешностей измерения псевдодальностей, которые обусловлены, главным образом, атмосферной рефракцией и погрешностями в знании векторов состояния навигационных космических аппаратов.

В целях радикального ослабления систематических погрешностей измерения псевдодальностей используются радиоэлектронные комплексы локальных, региональных и широкозонных контрольных станций.

Более эффективны комплексы локальной коррекции псевдодальностей, но зона действия локальной контрольной станции, как правило, не превышает нескольких десятков километров. А для навигационных космических аппаратов с малыми углами возвышения над плоскостью горизонта (менее 15 градусов) размер зоны действия контрольной станции уменьшается до единиц километров.

В радиоэлектронных комплексах широкозонной дифференциальной коррекции обеспечивается радикальное ослабление погрешностей в знании координат, составляющих вектора скорости навигационных космических аппаратов, частотно-временных смещений в бортовых эталонах времени и частоты. Данные погрешности были особенно большими в условиях применения режима селективного доступа. Широкозонные контрольные станции, оборудованные двухчастотными приемниками сигналов навигационных космических аппаратов, позволяли также оперативно оценивать состояние ионосферы и использовать данные оценки для формирования корректирующей информации для одночастотных приемников.

С середины 90-х годов внимание специалистов привлечено к разработке региональных комплексов контрольных станций. Идея региональной дифференциальной коррекции псевдодальностей была высказана в работе [1]. Здесь было показано, что пространственное поле погрешностей измерения псевдодальностей в регионе можно аппроксимировать плоскостью, ориентация которой характеризуется тремя параметрами. В дальнейшем в [2] дана статистическая трактовка задачи, а также сделано обобщение на использование квадратичного отрезка полинома Тейлора в трехмерном пространстве [3].

В последнее время широкое распространение получила региональная коррекция двойных разностей фазовых псевдодальностей. Разработаны пакеты программ, позволяющие реализовать сантиметровый уровень погрешностей оценок

координат как стационарных, так и мобильных объектов. Наиболее часто применяется двумерное представление поля погрешностей. При этом достаточно иметь три контрольные станции для оценки двух параметров ориентации поля погрешностей. В литературе отмечается, что такая технология успешно применяется при расстояниях между контрольными станциями, которые не превышают 50–60 километров. Кроме того, мобильный приемник должен находиться внутри области, ограниченной базовыми линиями.

В ряде приложений (строительство, межевание земель в сельской местности, планировка лесных массивов и др.) достаточно оценивать координаты с дециметровым уровнем погрешностей.

Представляет интерес выполнение анализа эффективности применения региональной коррекции **кодовых** псевдодальностей в сравнительно большом регионе при минимальном количестве контрольных станций.

Ниже кратко рассматривается структура спутниковой региональной системы координатно-временного обеспечения потребителей, излагается сущность двойной дифференциальной коррекции кодовых псевдодальностей и их разностей по навигационным космическим аппаратам (НКА). Далее конспективно описывается методика оценки вектора состояния приемника с учетом применения корректирующей информации, а также приводятся соображения по методике оценки эффективности коррекции кодовых псевдодальностей.

В целях количественной оценки эффективности применения двойной дифференциальной коррекции кодовых псевдодальностей, их разностей по НКА выполнено имитационное моделирование региональной системы применительно к Харьковской области.

Исследование выполнено в рамках **проекта 2167 УНТЦ**.

1. Структура спутниковой региональной системы координатно-временного обеспечения потребителей

Спутниковая региональная система координатно-временного обеспечения потребителей включает:

- главную контрольную станцию, центр сбора и обработки информации;
- периферийные контрольные станции;
- пункты контроля качества корректирующей информации.

Для определения параметров ориентации плоского поля погрешностей измерения кодовых псевдодальностей в трехмерном пространстве необходимо иметь одну главную и три периферийные контрольные станции. Координаты антенн контрольных станций, пунктов контроля качества корректирующей информации полагаются известными на сантиметровом уровне погрешностей. Шкалы времени контрольных станций, пунктов контроля качества корректирующей информации синхронизированы со шкалой времени системы GPS с погрешностью порядка сотен наносекунд, хотя фактические расхождения шкал времени могут быть в пределах 0, 5 мс.

Контрольные станции связаны каналами двухсторонней связи с главной контрольной станцией, на которой осуществляются формирование корректирующей информации и ее последующая передача потребителям.

Пункты контроля качества корректирующей информации призваны оценить качество коррекции как на уровне измерений псевдодальностей или их разностей

по НКА, так и на уровне оценок своего вектора состояния (координат и частотно-временных смещений).

2. Двойная дифференциальная коррекция кодовых псевдодальностей и их разностей по навигационным космическим аппаратам

Источником информации для дифференциальной коррекции кодовых псевдодальностей являются измеренные на контрольных станциях разности наблюдаемых $u_{kj\alpha}$ и расчетных $\tilde{D}_{kj\alpha}$ псевдодальностей:

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

где k - индекс дискретного времени,
 j - номер навигационного космического аппарата,
 α - номер контрольной станции.

Локальная (одинарная) дифференциальная коррекция кодовой псевдодальности сводится к вычитанию полной погрешности измерения псевдодальности, определенной на контрольной станции, из наблюдаемой псевдодальности в аппаратуре потребителя. Эффективность такой коррекции существенно уменьшается по мере удаления потребителя от контрольной станции.

Двойная дифференциальная коррекция кодовых псевдодальностей предполагает наличие пространственной корреляции полных погрешностей измерения кодовых псевдодальностей в регионе.

Для такой коррекции сначала находят параметры ориентации поля погрешностей в пространстве. В простейшем случае оценка вектора $\hat{\lambda}_{kj}^T = (\hat{a}_{kj}, \hat{b}_{kj}, \hat{c}_{kj})$ параметров ориентации плоского поля погрешностей определяется выражением

$$\hat{\lambda}_{kj} = \underline{C}^{-1} \cdot \Delta \delta \vec{u}_{kj}, \quad (2)$$

где

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \\ x_3 - x_0 & y_3 - y_0 & z_3 - z_0 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

x_i, y_i, z_i - координаты антенн контрольных станций ($i = 0, 1, 2, 3$);

$$\Delta \delta \vec{u}_{kj} = \begin{pmatrix} \delta u_{kj1} - \delta u_{kj0} \\ \delta u_{kj2} - \delta u_{kj0} \\ \delta u_{kj3} - \delta u_{kj0} \end{pmatrix}$$

(4)

вектор разностей по контрольным станциям полных погрешностей измерения кодовых псевдодальностей.

При обработке кодовых псевдодальностей в аппаратуре потребителей имеется возможность определить его координаты и смещение шкалы времени относительно системного времени. Если задача заключается только в определении координат потребителя, то в качестве исходных измерений можно использовать разности наблюдаемых кодовых псевдодальностей по навигационным космическим аппаратам $\nabla u_{kjl} = u_{kj} - u_{kl}$, причем индексом (1) отмечен опорный навигационный космический аппарат (как правило, это навигационный космический аппарат с наибольшим углом возвышения над горизонтом).

Вектор параметров ориентации поля погрешностей измерения разностей по НКА кодовых псевдодальностей $\hat{\lambda}_{kj(1)}^T = (\hat{a}_{kj(1)}, \hat{b}_{kj(1)}, \hat{c}_{kj(1)})$ определяется выражением

$$\hat{\lambda}_{kj(1)} = \underline{C}^{-1} \cdot \Delta \nabla \delta \bar{u}_{kj(1)}, \quad (5)$$

где

$$\Delta \nabla \bar{u}_{kj(1)} = \begin{pmatrix} \delta \nabla u_{kj(1)1} - \delta \nabla u_{kj(1)0} \\ \delta \nabla u_{kj(1)2} - \delta \nabla u_{kj(1)0} \\ \delta \nabla u_{kj(1)3} - \delta \nabla u_{kj(1)0} \end{pmatrix}; \quad (6)$$

$$\delta \nabla u_{kj(1)\alpha} = (u_{kj\alpha} - \tilde{D}_{kj\alpha}) - (u_{k(1)\alpha} - \tilde{D}_{k(1)\alpha}) = \delta u_{kj\alpha} - \delta u_{k(1)\alpha}; \quad (\alpha = 0, 1, 2, 3). \quad (7)$$

Фактически здесь используются двойные разности кодовых псевдодальностей (как по навигационным космическим аппаратам, так и по контрольным станциям).

С учетом корреляции поля погрешностей по времени целесообразно находить осредненные оценки параметров ориентации поля на интервале постоянства параметров. Это существенно снижает влияние случайных погрешностей в исходных наблюдениях. Несколько более сложный алгоритм оценки параметров ориентации поля погрешностей, приведенный в работе [4], учитывает взаимную корреляцию случайных погрешностей в наблюдаемых разностях по контрольным станциям.

Двойная дифференциальная коррекция кодовых псевдодальностей формируется суммированием погрешности главной контрольной станции с дополнительным слагаемым, определяемым с применением оценок параметров ориентации поля погрешностей и приближенных координат потребителя x_r, y_r, z_r :

$$dd \tilde{D}_{kj_r} = \delta u_{kj0} + \hat{a}_{kj} \cdot (x_r - x_0) + \hat{b}_{kj} \cdot (y_r - y_0) + \hat{c}_{kj} \cdot (z_r - z_0). \quad (8)$$

Аналогичное выражение используется для формирования двойной дифференциальной коррекции разностей кодовых псевдодальностей по НКА:

$$dd \nabla \tilde{D}_{kj(1)_r} = \delta \nabla u_{kj(1)0} + \hat{a}_{kj(1)} \cdot (x_r - x_0) + \hat{b}_{kj(1)} \cdot (y_r - y_0) + \hat{c}_{kj(1)} \cdot (z_r - z_0). \quad (9)$$

Для оценки эффективности дифференциальной коррекции предлагается использовать результаты обработки данных в пунктах контроля качества корректирующей информации. Эффективность локальной (одинарной) коррекции может быть определена уровнем остаточной погрешности, получаемой вычитанием погрешности главной контрольной станции из погрешности, определенной в данном пункте контроля. Эффективность региональной (двойной) коррекции предлагается оценить величиной остаточной погрешности, получаемой вычитанием погрешности «виртуальной контрольной станции» (8) из погрешности, определенной в пункте контроля качества. Представляется целесообразным находить средние (на интервале постоянства параметров ориентации поля погрешностей) значения остаточных погрешностей.

Наибольшее внимания заслуживает оценка эффективности коррекции псевдодальностей или их разностей по НКА по степени уменьшения полных погрешностей определения вектора состояния потребителя. Как правило, для оценки вектора состояния потребителя используется алгоритм фильтра Калмана. Такой алгоритм функционирует в реальном масштабе времени, используя выборку наблюдений нарастающего объема. Начальной оценкой вектора состояния потребителя служит оценка, полученная методом максимального правдоподобия.

3. Программное обеспечение имитационной модели спутниковой региональной системы координатно-временного обеспечения потребителей

Имитационная модель региональной системы реализуется пакетом прикладных программ, позволяющих решать ряд частных задач.

Программа SatWatcher решает задачу планирования сеанса навигационных измерений, выбора рабочего созвездия навигационных космических аппаратов GPS, а также задачу расчета координат и составляющих вектора скорости рабочих НКА в пределах выбранного сеанса связи с заданным шагом дискретности по времени. Исходной информацией при этом служат альманахи параметров орбит НКА GPS и координаты главной контрольной станции.

Программа CorWin позволяет вычислить систематические медленноменяющиеся погрешности измерения кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей, обусловленных тропосферной и ионосферной рефракцией, а также погрешностями в знании векторов состояния рабочих НКА. Исходными данными для этой программы служат:

- геодезические координаты контрольных станций и пунктов контроля качества корректирующей информации;
- параметры модели тропосферной рефракции;
- параметры модели ионосферной рефракции;
- файл с погрешностями в знании векторов состояния рабочих НКА.

Программа Att3_5m решает задачу оценки вектора состояния неподвижного потребителя методом фильтра Калмана по измерениям кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей относительно четырех НКА с учетом наличия систематических медленноменяющихся погрешностей измерения кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей. Программа поддерживает два режима обработки данных. При обработке четырех псевдодальностей и четырех псевдоскоростей определяются пять элементов вектора состояния неподвижного потребителя: три координаты, погрешность шкалы времени и погрешность частоты опорного генератора. При обработке трех разностей псевдодальностей по НКА и трех разностей псевдоскоростей определяются только координаты потребителя.

Выходной информацией при этом являются:

- файл калмановских оценок вектора состояния приемника;
- файл полных и среднеквадратических погрешностей оценок вектора состояния приемника;
- файл измеряемых псевдодальностей и псевдоскоростей относительно четырех НКА (или файл измеряемых разностей по НКА псевдодальностей и псевдоскоростей);
- файл наблюдаемых псевдодальностей и псевдоскоростей относительно четырех НКА (или файл наблюдаемых разностей по НКА псевдодальностей и псевдоскоростей).

При формировании наблюдаемых псевдодальностей, псевдоскоростей (или их разностей по НКА) учитываются систематические погрешности измерения, а также случайные погрешности с заданным уровнем среднеквадратических отклонений.

При формировании псевдодальностей и псевдоскоростей использовалась модель частотно-временных флуктуаций в дискретном времени [3], параметры которой вводятся с редактируемого экрана.

Отдельная программа **Subest** позволяла вычислить расстояние между двумя приемниками с использованием файлов калмановских оценок их координат, а также эталонных значений координат.

Основной программой, формирующей двойную дифференциальную корректирующую информацию для кодовых псевдодальностей или их разностей по НКА, является программа **MAC4**. Программа учитывает работу четырех контрольных станций для оценки параметров ориентации пространственного поля погрешностей измерения кодовых псевдодальностей или их разностей по НКА, а также вычисляет корректирующую информацию для одного пункта контроля качества корректирующей информации. Для этого пункта определяется и остаточная погрешность в наблюдениях кодовых псевдодальностей для текущего момента времени и в среднем за сеанс.

В данной программе предусмотрены два варианта оценки параметров ориентации пространственного поля погрешностей. В первом варианте эти параметры определялись по полной выборке данных за сравнительно короткий интервал времени методом максимального правдоподобия. Во втором варианте эти оценки находились рекуррентно по выборке нарастающего объема. Параметры ориентации пространственного поля полагались неизменными в рассматриваемом интервале времени, но на график выводились оценки данных параметров на текущие моменты времени.

Входными данными для программы MAC4 служат файлы измеряемых и наблюдаемых псевдодальностей и псевдоскоростей (или их разностей по НКА), являющиеся выходными файлами программы Att3_5m.

Для анализа эффективности двойной дифференциальной коррекции кодовых псевдодальностей (или их разностей по НКА) на уровне оценок вектора состояния неподвижного потребителя вновь использовалась программа Att3_5m, но вместо систематических погрешностей измерений псевдодальностей использовались остаточные погрешности этих измерений (из выходных файлов программы MAC4).

4. Исходные данные имитационного моделирования региональной системы координатно-временного обеспечения потребителей в Харьковской области

Моделируемая региональная система включает четыре контрольные станции, расположенные в районах Харькова, Великого Бурлука, Краснокутска и Лозовой. Кроме того, имеются контрольные станции, выполняющие роль пунктов контроля качества корректирующей информации. В табл. 1 содержатся координаты антенн станций, а также расстояния до главной контрольной станции в Харькове.

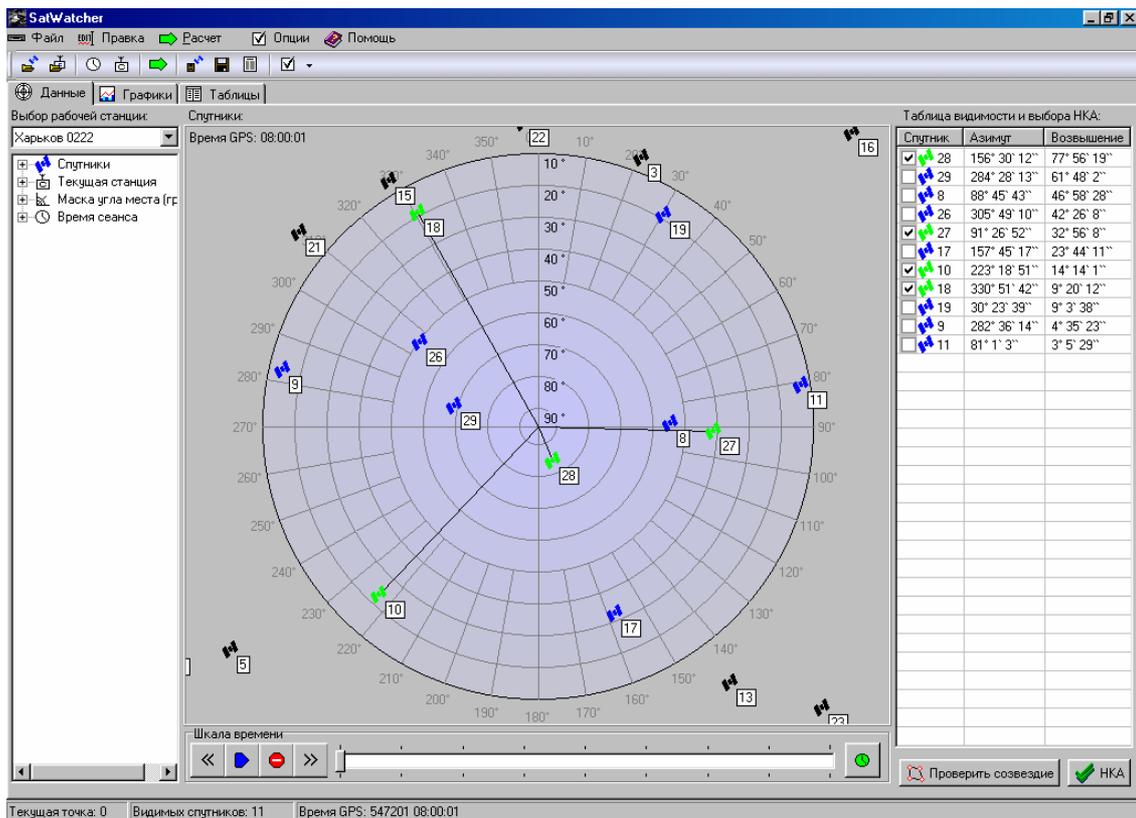
Сеанс навигационных измерений выбран на 21.10.2006 г. с 08.00.00 до 08.02.00 по шкале времени системы GPS. На рисунке показана навигационная обстановка в Харькове на 08.00.00. Рабочее созвездие навигационных космических аппаратов включает аппараты с бортовыми номерами 28, 27, 10, 18. Угловые координаты НКА приведены в верхней правой части рисунка.

Для расчета систематических погрешностей измерения псевдодальностей и псевдоскоростей с использованием известных моделей тропосферной и ионосферной рефракции применялись параметры обстановки, приведенные в табл. 2. Погрешности в знании векторов состояния НКА представлены в табл. 3.

Таблица 1

Дислокация контрольных станций и пунктов контроля качества корректирующей информации в Харьковской области

Номер РКС, ПКК	Район	B	L	H, м	D, км
0	Харьков	50° 02'	36° 17'	200	0
1	Великий Бурлук	50° 03'	37° 23'	200	78,067
2	Краснокутск	50° 03'	35° 10'	230	80,717
3	Лозовая	48° 52'	36° 15'	160	130,086
4	Староверовка	49° 32'	35° 45'	205	68,880
5	Балаклея	49° 28'	36° 53'	220	76,908
6	Змиев	49° 40'	36° 21'	210	42,047
7	Чугуев	45° 50'	36° 42'	190	37,351
8	Купянск	49° 41'	37° 38'	210	104,306
9	Шевченково	49° 42'	37° 10'	180	73,450
10	Первомайский	49° 22'	36° 15'	190	75,283
11	Богодухов	50° 03'	35° 31'	220	55,649



Навигационная обстановка в Харькове 21.10.2006 г. на 08.00.00 GPST

При моделировании наблюдаемых псевдодалей случайные погрешности имели среднеквадратическое отклонение порядка 0,3 м, а среднеквадратическая погрешность измерения псевдоскоростей составляла величину 0,01 м/с .

Таблица 2

Параметры обстановки в регионе Харьковской области 21.10.2006

Номер РКС, ПКК	P, Па	T, °C	HM, %	H ₁ , км	H ₂ , км	N _{max} , 10 ¹¹ 1/м ³	H _T , км	H ₀ , м
0	101300	7	80	325	225	5	7	200
1	101200	8	90	325	225	5	7	200
2	101150	9	70	325	225	5	7	230
3	101100	11	75	325	225	5	7	160
4	101050	10	85	325	225	5	7	205
5	101070	8	80	325	225	5	7	220
6	101035	8	85	325	225	5	7	210
7	101045	7	70	325	225	5	7	190
8	101024	8	75	325	225	5	7	210
9	101010	6	70	325	225	5	7	180
10	101250	9	88	325	225	5	7	190
11	101220	8	85	325	225	5	7	220

Таблица 3

Погрешности в знании векторов состояния НКА рабочего созвездия

Номер 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
28	2	2	54	2,5	1,5	3,5	20	0,2
27	3	3	1,9	4,5	3,5	2,5	16	0,1
10	5	3,2	1,6	2	1,5	1,5	10	0,4
18	4,5	3,4	2,5	3,8	3,6	4,5	12	0,5

5. Основные результаты моделирования региональной системы

В табл. 4 приведены средние за сеанс длительностью 120 с при дискретности во времени 1 с полные погрешности наблюдаемых псевдодалей. Выходные файлы программы CorWin содержат информацию о тропосферных, ионосферных и эфемеридных (орбитальных) погрешностях измерения кодовых псевдодалей. Выходные файлы программы CorWin содержат также частные и суммарные погрешности в измерениях псевдоскоростей, которые могут быть использованы при решении задачи локальной или региональной коррекции псевдоскоростей.

По наблюдаемым погрешностям измерения кодовых псевдодалей на четырех контрольных станциях найдены параметры ориентации пространственных полей погрешностей измерения кодовых псевдодалей, которые представлены в табл. 5. В программе Mac4 предусмотрена полиномиальная предвари-

тельная обработка наблюдаемых псевдодальностей на скользящем интервале времени наблюдения заданной длительности для уменьшения уровня случайных погрешностей измерения псевдодальностей.

Таблица 4

Средние за сеанс полные погрешности измерения псевдодальностей (м)

Номер РКС, ПКК	НКА 28	НКА 27	НКА 10	НКА 18
0	18,747	24,043	34,339	32,700
1	18,809	24,888	35,011	33,418
2	18,776	24,257	34,060	32,307
3	18,745	24,041	33,547	34,214
4	18,854	24,295	34,159	33,598
5	18,706	23,780	33,959	33,301
6	18,735	24,034	34,124	33,220
7	18,780	23,970	34,399	33,100
8	18,745	23,804	34,696	33,884
9	18,773	23,868	34,523	33,541
10	18,757	24,051	33,980	33,763
11	18,817	24,329	34,207	32,552

Таблица 5

Средние за сеанс параметры ориентации пространственного поля погрешностей измерения кодовых псевдодальностей для рабочих НКА

Номер НКА	$\hat{a} \cdot 10^4$	$\sigma_a \cdot 10^5$	$\hat{b} \cdot 10^4$	$\sigma_b \cdot 10^5$	$\hat{c} \cdot 10^4$	$\sigma_c \cdot 10^5$
28	-2,572	1,586	-1,889	1,165	-3,754	2,311
27	-0,358	1,322	-0,290	0,971	-0,536	1,926
10	-1,596	1,595	-1,088	1,171	-2,169	2,323
18	-1,736	1,549	-1,178	1,138	-2,624	2,257

При использовании разностей псевдодальностей по НКА опорным выбран НКА №28 (зенитный). В табл. 6 даны параметры ориентации полей погрешностей измерения разностей кодовых псевдодальностей в трехмерном пространстве.

Таблица 6

Средние за сеанс параметры ориентации пространственного поля погрешностей измерения разностей кодовых псевдодальностей по НКА

Номер пары НКА	$\hat{a} \cdot 10^4$	$\sigma_a \cdot 10^5$	$\hat{b} \cdot 10^4$	$\sigma_b \cdot 10^5$	$\hat{c} \cdot 10^4$	$\Sigma_c \cdot 10^5$
28-27	2,475	2,886	1,833	2,119	3,634	4,204
28-10	4,120	2,931	2,935	2,153	5,857	4,270
28-18	4,347	2,369	3,112	1,740	6,469	3,452

Табл. 7 и 8 содержат остаточные погрешности в наблюдаемых псевдодальностях и в разностях псевдодальностей по НКА после использования локальной (одинарной) коррекции по данным только главной контрольной станции, а также после региональной (двойной) коррекции по данным комплекса региональных контрольных станций.

Таблица 7

Средние за сеанс остаточные погрешности измерения кодовых псевдодальностей (м) после их двойной (2) дифференциальной коррекции и после одинарной (1) коррекции в пунктах контроля качества корректирующей информации

Номер ПКК	НКА 28		НКА 27		НКА 10		НКА 18	
	2	1	2	1	2	1	2	1
4	0,272	0,107	0,206	0,252	0,442	-0,180	0,709	0,898
5	0,146	-0,042	0,193	-0,262	-0,203	-0,380	-0,319	0,601
6	0,269	-0,012	-0,126	-0,009	0,112	-0,215	0,093	0,520
7	0,282	0,033	0,072	-0,073	-0,019	0,06	-0,033	0,400
8	-0,155	-0,002	-0,078	-0,239	-0,145	0,357	-0,209	1,183
9	0,013	0,025	0,047	-0,175	-0,176	0,184	-0,071	0,842
10	0,205	0,01	-0,054	0,008	0,167	-0,358	0,450	1,063
11	0,051	0,069	0,178	0,285	0,071	-0,132	0,208	-0,148

Таблица 8

Средние за сеанс остаточные погрешности измерения разностей псевдодальностей по НКА (м) после их двойной (2) дифференциальной коррекции и одинарной (1) коррекции в пунктах контроля качества корректирующей информации

Номер ПКК	НКА 28-27		НКА 28-10		НКА 28-18	
	2	1	2	1	2	1
4	-0,329	-0,122	-0,636	0,365	-0,783	-0,798
5	-0,100	0,194	0,285	0,483	0,166	-0,641
6	-0,132	0,065	-0,228	0,306	-0,136	-0,393
7	-0,071	0,260	-0,066	0,098	-0,183	-0,322
8	0,077	0,251	0,408	-0,292	-0,130	-1,130
9	0,051	0,298	0,105	-0,093	0,043	-0,754
10	-0,006	0,051	-0,059	0,501	-0,293	-0,896
11	-0,117	-0,162	-0,192	0,201	-0,123	0,206

В табл. 9 и 10 приведены средние за последние 90 секунд сеанса полные погрешности оценок координат приемника в пунктах контроля качества корректирующей информации. Здесь приведены полные погрешности как без применения, так и с применением двойной дифференциальной коррекции кодовых псевдодальностей или их разностей по НКА.

В первые 30 секунд сеанса наблюдались переходные процессы на выходе фильтра Калмана, поэтому соответствующие выходные данные игнорировались.

При обработке кодовых псевдодальностей оценивались не только координаты, но и погрешности шкал времени приемников. Полные погрешности таких оценок были на уровне 170 – 190 наносекунд, если коррекция псевдодальностей не применялась. При использовании двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей полные погрешности оценок смещений шкал времени уменьшались до единиц наносекунд. Это представляется важным для задач синхронизации эталонов времени и частоты в рассматриваемом регионе.

Таблица 9

Полные погрешности оценок координат без применения и с применением двойной дифференциальной коррекции кодовых псевдодальностей

Номер РКС, ПКК	Δx , м	$\Delta x_{\text{корр}}$, м	Δy , м	$\Delta y_{\text{корр}}$, м	Δz , м	$\Delta z_{\text{корр}}$, м
0	6,431		7,959		13,938	
1	6,351		8,491		14,107	
2	6,414		7,614		13,773	
3	7,074		8,697		12,791	
4	6,834	0,050	8,306	0,306	13,538	0,018
5	6,479	-0,418	8,370	-0,174	13,209	-0,447
6	6,600	-0,364	8,233	0,094	13,523	-0,356
7	6,483	-0,128	8,173	-0,191	13,779	-0,258
8	6,550	-0,007	8,770	-0,102	13,724	-0,059
9	6,575	0,172	8,509	-0,117	13,677	-0,019
10	6,850	-0,153	8,491	0,249	13,272	-0,290
11	6,490	0,078	8,687	-0,012	13,890	-0,054

Таблица 10

Полные погрешности оценок координат без применения и с применением двойной дифференциальной коррекции разностей по НКА кодовых псевдодальностей

Номер РКС, ПКК	Δx , м	$\Delta x_{\text{корр}}$, м	Δy , м	$\Delta y_{\text{корр}}$, м	Δz , м	$\Delta z_{\text{корр}}$, м
0	6,468		7,979		13,991	
1	6,524		8,483		14,262	
2	6,461		7,591		13,817	
3	7,041		8,746		12,756	
4	6,935	-0,488	8,314	-0,350	13,596	-0,723
5	6,645	0,028	8,350	0,171	13,325	0,189
6	6,584	-0,119	8,193	-0,045	13,592	-0,284
7	6,383	-0,108	8,294	-0,104	13,728	-0,168
8	6,643	0,114	8,753	0,085	13,874	0,358
9	6,444	0,065	8,537	0,0012	13,630	0,088
10	6,836	-0,077	8,470	-0,189	13,336	-0,124
11	6,545	-0,101	8,780	-0,047	13,968	-0,193

Выводы

Основные результаты имитационного моделирования региональной спутниковой системы координатно-временного обеспечения потребителей позволяют сделать следующие выводы и предложить направления дальнейших исследований.

1. Двойная дифференциальная коррекция кодовых псевдодальностей обеспечивает существенное снижение систематических погрешностей измерения кодовых псевдодальностей особенно для НКА с малыми углами возвышения над горизонтом (см. табл. 7), что, в свою очередь, приводит к радикальному уменьшению полных погрешностей оценок координат (см. табл. 9),
2. Двойная дифференциальная коррекция разностей кодовых псевдодальностей по НКА предпочтительна в целях ослабления влияния динамики поведения шкал времени контрольных станций и потребителей. Остаточные погрешности измерения разностей кодовых псевдодальностей по НКА, как правило, меньше остаточных погрешностей, свойственных локальной коррекции (см. табл. 8). Данная коррекция также существенно уменьшает полные погрешности оценок координат (см. табл. 10).
3. Эффективность двойной дифференциальной коррекции кодовых псевдодальностей или их разностей по НКА зависит от дислокации потребителя в регионе. Уровень снижения полной погрешности определения координат выше для потребителей, расположенных внутри зоны, ограниченной базовыми линиями контрольных станций комплекса (см. табл. 7, 8).

В дальнейшем представляется целесообразным рассмотреть задачи:

- оценки вектора состояния подвижного объекта, включив в него составляющие вектора скорости, а также предусмотрев по крайней мере локальную коррекцию псевдоскоростей;
- оценок координат потребителей по двойным разностям кодовых псевдодальностей с использованием региональной коррекции псевдодальностей и принципа виртуальных контрольных станций.

Список литературы

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 / Хомяков Э.Н., Наумова Е.Э., Трикоз Д.В. и др. //Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т». - 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.
Хомяков Э.Н., Наумова Е.Э. Спутниковые радионавигационные системы.
4. Радиоэлектронные комплексы региональных контрольных станций: Учеб. пособие. - Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т».2003. – 106 с.