

УДК 629.7.05

Э.Н. ХОМЯКОВ¹, Е.Э. НАУМОВА²¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Украина*

СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ В РАСШИРЕННЫХ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ

В статье приводится краткий обзор основных направлений исследований, выполненных в лаборатории 530 спутниковых систем радионавигации, радиогеодезии и точного времени. Первое направление касается разработки и программной реализации оценки векторов состояния потребителей на основе использования фильтров Калмана. Второе направление связано с разработкой моделей и методов региональной двойной дифференциальной коррекции кодовых псевдодальностей, их разностей по навигационным космическим аппаратам, а также двойной дифференциальной коррекции оценок координат неподвижных потребителей. Третье направление связано с созданием информационных технологий обработки измерений в аппаратуре потребителей, на контрольных станциях в интересах оценок погрешностей наблюдения. Кратко формулируются постановки задач, рассматриваются используемые стохастические модели наблюдений, векторов состояния контролируемых объектов, обсуждаются методы решения задач и основные полученные результаты. Отмечается активное участие студентов пятого и шестого курсов радиотехнического факультета в научных исследованиях лаборатории.

Ключевые слова: *расширенные глобальные навигационные спутниковые системы, вектор состояния потребителя, фильтры Калмана, навигационные космические аппараты, региональная дифференциальная коррекция.*

Введение

Лаборатория 530 спутниковых систем радионавигации, радиогеодезии и точного времени создана в 1991-1992 годах для обеспечения учебного процесса по новым специальным курсам:

- спутниковые радионавигационные системы;
- радиоэлектронные комплексы контроля траектории и управления движением летательных аппаратов;
- информационно-измерительные системы и комплексы (командно-измерительные системы и комплексы для управления космическими аппаратами).

Научные исследования были направлены, в первую очередь, на разработку учебно-исследовательской лабораторной базы по данным спецкурсам. Исследования также выполнялись по договорам о научно-техническом сотрудничестве с НИИ РИ, ИРЭ АН Украины, НПО «Метрология», Научным метрологическим Центром военных эталонов, с Центром управления спутниковыми навигационными системами ГЛОНАСС, ЦИКАДА. Кроме того, выполнялись хозяйственные научно-исследовательские работы по частным техническим заданиям Днепропетровского КБ «Южное» и Ленинградского

научно-исследовательского радиотехнического института.

Научно-исследовательские работы проводились в трех направлениях.

Первое направление касается разработки и программной реализации оценки векторов состояния потребителей на основе использования фильтров Калмана. В качестве потребителей рассматривались баллистические летательные аппараты, в частности, околоземные космические аппараты типа «ЦИКАДА», «INMARSAT-P», космические аппараты на геостационарной орбите «INMARSAT-IV». Для оценки траекторий таких потребителей применялся нелинейный фильтр Калмана. Для задачи контроля траектории летательного аппарата в местной системе координат аэродрома при управлении снижением и посадкой использовался фильтр Калмана, линейный по состоянию и нелинейный по наблюдениям. Аналогичный алгоритм применялся для оценки вектора состояния неподвижного потребителя.

Второе направление связано с разработкой моделей и методов региональной двойной дифференциальной коррекции кодовых псевдодальностей, их разностей по навигационным космическим аппаратам, а также двойной дифференциальной коррекции оценок координат неподвижных потребителей.

Третье направление связано с созданием информационных технологий обработки измерений в аппаратуре потребителей, на контрольных станциях в интересах оценок погрешностей наблюдения в целях их дальнейшего учета в адаптивных алгоритмах оценок векторов состояния потребителей.

При выполнении научных исследований основные усилия направлялись на разработку пакетов прикладных программ для имитационного моделирования предлагаемых информационных технологий обработки измерений в расширенных глобальных навигационных спутниковых системах. Наличие в лаборатории аппаратуры потребителей АСН-16 (ГЛОНАСС), АСЕ-III (GPS), ВМ 2000 (GPS, ГЛОНАСС) дало возможность разработать программы планирования сеансов навигационных измерений по альманахам параметров орбит навигационных космических аппаратов GPS, ГЛОНАСС, программы расчета эфемерид навигационных космических аппаратов по полному кадру служебной информации. Много внимания всегда уделялось разработке технологий и программ обработки экспериментальных данных в целях анализа точности как измерений, так и результирующих оценок векторов состояния потребителей.

Учитывая малочисленность штатного состава лаборатории (один профессор и один инженер из числа бывших дипломников), к исследованиям привлекались талантливые и трудолюбивые студенты пятого и шестого курсов.

Цель данной статьи заключается в кратком, но конструктивном обзоре основных направлений исследований, выполненных в лаборатории 530, и в обзоре основных результатов этих исследований. Более детальные сведения о полученных результатах отражены в научных публикациях и в учебных пособиях, частичный перечень которых приведен в конце статьи.

1. Модели и методы обработки измерений при оценке вектора состояния потребителей на основе использования фильтров Калмана

Глобальная навигационная спутниковая система содержит орбитальную группировку навигационных космических аппаратов, наземный комплекс управления, ракетно-космический комплекс средств вывода навигационных космических аппаратов на орбиты, аппаратуру потребителей. Расширенная глобальная навигационная спутниковая система включает функциональное дополнение космического базирования (дополнительная группировка навигационно-связных космических аппаратов). Другое расширение спутниковой навигационной системы

связано с функциональным дополнением наземного базирования, которое включает псевдоспутники, радиоэлектронные комплексы локальных, региональных и широкозонных контрольных станций.

Для контроля траектории баллистических летательных аппаратов с использованием средств расширенной глобальной навигационной спутниковой системы исследовались две возможности. Первая возможность предполагала использование на борту летательного аппарата аппаратуры потребителя в полной комплектации. Вторая возможность предполагала установку на борту контролируемого аппарата ретранслятора сигналов навигационных космических аппаратов. Для приема и обработки ретранслированных сигналов предполагалась специальная аппаратура наземной станции. Этот вариант более предпочтителен для контроля траекторий малоразмерных летательных аппаратов.

Динамика движения неуправляемого околоземного космического аппарата в гринвичской системе координат при высотах орбиты более 300 км описывается известной системой нелинейных дифференциальных уравнений [1], в которых учитывается ускорение земного тяготения и эффект вращения системы координат. Для сравнительно больших интервалов времени наблюдения необходимо учитывать ускорения, обусловленные полярным сжатием Земли.

В качестве измеряемых функций в уравнении наблюдения можно использовать псевдодальности и псевдоскорости. При этом необходимо систему дифференциальных уравнений движения космического аппарата дополнить двумя дифференциальными уравнениями для частотно-временных погрешностей аппаратуры потребителя или аппаратуры наземной станции приема и обработки ретранслированных навигационных сигналов. Если ограничиться задачей контроля траектории в пространстве, то следует использовать разности псевдодальностей по источникам навигационных сигналов и соответствующие разности псевдоскоростей. Все эти функции нелинейные, поэтому для оценки траектории околоземного космического аппарата естественно использовать технологию нелинейного фильтра Калмана [2].

Первые исследования в области контроля траектории баллистических летательных аппаратов выполнены в 1991–1992 годах. Выдающиеся дипломники тех лет Д.В. Трикоз и О.В. Омелаенко разработали пакеты прикладных программ по планированию измерений по альманаху параметров орбит навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и по имитационному моделированию нелинейного фильтра Калмана для контроля траектории малоразмерных летательных аппаратов с

ретрансляторами навигационных сигналов.

Дальнейшие исследования в области контроля траектории околоземных космических аппаратов средствами расширенной спутниковой навигационной системы проводились в 1993–1995 годах с участием выдающихся дипломников В.Н. Золотарева и В.С. Кащенко.

В.Н. Золотаревым разработана программа анализа потенциальной точности контроля траектории околоземного космического аппарата с учетом возможности обработки измерений псевдодальностей и псевдоскоростей, а также их разностей по источникам навигационных сигналов как на борту космического аппарата, так и на наземной станции. Помимо четырех космических аппаратов ГЛОНАСС из основной орбитальной группировки предусматривалась возможность использовать измерения по двум наземным псевдоспутникам и по двум геостационарным космическим аппаратам типа INMARSAT-IV.

В.С. Кащенко в процессе дипломного проектирования разработал пакет прикладных программ полного имитационного моделирования расширенной глобальной навигационной спутниковой системы применительно к контролю траектории околоземных космических аппаратов.

Результаты этих исследований были отражены в докладах на научно-технических конференциях УкрТелеКом [3, 4]. Кроме того, основные результаты опубликованы в статье [5], а также представлены в нескольких отчетах о НИР, выполненных в интересах НИИ РИ.

С 1996 года по рекомендации основоположника теоретических основ спутниковой радионавигации, профессора Ленинградского научно-исследовательского радиотехнического института В.С. Шебшаевича в лаборатории 530 начаты исследования в области применения расширенной спутниковой навигационной системы для контроля траектории, управления снижением и посадкой летательных аппаратов на аэродромы, которые не имеют традиционных посадочных радиосистем.

Результатом этих исследований явилась имитационная модель расширенной спутниковой навигационной системы, которая учитывала возможность приема на борту летательного аппарата сигналов четырех навигационных космических аппаратов с наилучшим значением геометрического фактора, сигналов двух геостационарных космических аппаратов и сигналов двух псевдоспутников, расположенных симметрично относительно осевой линии взлетно-посадочной полосы. В качестве измеряемых функций использовались разности псевдодальностей, псевдоскоростей по источникам навигационных сигналов. В качестве опорного сигнала был вы-

бран сигнал навигационного космического аппарата с наибольшим углом возвышения над плоскостью горизонта.

В структуре расширенной спутниковой навигационной системы предполагалось наличие локальной контрольной станции и допускалась возможность передачи на борт летательного аппарата корректирующей информации с использованием сигналов псевдоспутников.

В окрестности программной траектории снижения и посадки управляемое движение летательного аппарата в местной системе координат аэродрома описывалось системой стохастических линейных уравнений

$$\begin{cases} \frac{d\delta V_x(t)}{dt} = -\alpha_x \cdot \delta V_x(t) + \delta U_x(t) + \xi_x(t); \\ \frac{d\delta V_y(t)}{dt} = -\alpha_y \cdot \delta V_y(t) + \delta U_y(t) + \xi_y(t); \\ \frac{d\delta V_z(t)}{dt} = -\alpha_z \cdot \delta V_z(t) + \delta U_z(t) + \xi_z(t); \\ \frac{d\delta x(t)}{dt} = V_x(t); \\ \frac{d\delta y(t)}{dt} = V_y(t); \\ \frac{d\delta z(t)}{dt} = V_z(t), \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\delta \vec{\lambda}^T(t) = \{ \delta V_x(t), \delta V_y(t), \delta V_z(t), \delta x(t), \delta y(t), \delta z(t) \} -$$

вектор состояния летательного аппарата;

$$\delta \vec{U}^T(t) = \{ \delta U_x(t), \delta U_y(t), \delta U_z(t) \} -$$

вектор управляющих функций;

$$\vec{\xi}^T(t) = \{ \xi_x(t), \xi_y(t), \xi_z(t), 0, 0, 0 \} -$$

вектор возмущающих ускорений, полагаемый белым шумом с характеристиками

$$\langle \vec{\xi}(t) \rangle = \vec{\chi}(t); \quad \overset{\circ}{\xi}(t) = \vec{\xi}(t) - \vec{\chi}(t);$$

$$\left\langle \overset{\circ}{\xi}(t_1) \cdot \overset{\circ}{\xi}^T(t_2) \right\rangle = \frac{1}{2} \Theta_{\xi}(t_1) \cdot \delta(t_1 - t_2);$$

$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ – параметры динамики летательного аппарата, полагаемые для небольшого времени наблюдения известными постоянными величинами.

Имитационная модель позволяла учитывать взаимную корреляцию элементов вектора случайных погрешностей разностных измерений, систематические погрешности измерений, обусловленные тропосферной и ионосферной рефракцией, эффектом Саньяка.

Для оценки траектории летательного аппарата в процессе управления снижением и посадкой исполь-

зовался фильтр Калмана, линейный по состоянию и нелинейный по наблюдениям.

Пакет прикладных программ для имитационного моделирования расширенной спутниковой системы управления снижением и посадкой летательного аппарата разработал в 1999–2000 годах выдающийся инженер и программист С.Г. Шаповалов. С использованием имитационной модели было выполнено много вычислительных экспериментов, показавших возможность реализации требований ИСАО при посадке по III категории сложности.

Основные соотношения для формирования оптимальных управляющих функций и для реализации фильтра Калмана, структура программы имитационного моделирования радиоэлектронного комплекса, некоторые результаты моделирования приведены в статье [6].

Особое внимание в лаборатории 530 уделялось всегда оценке вектора состояния неподвижного потребителя. Эта задача часто встречается на практике, например, при развитии геодезических сетей, при выполнении кадастровых работ, при наблюдении за состоянием ледников, протяженных естественных и искусственных объектов. Особую роль данная задача играет при уточнении координат антенн радиоэлектронных систем в наземных комплексах управления космическими аппаратами, в полигонных измерительных комплексах, а также при синхронизации пространственно-разнесенных эталонов времени и частоты.

Вектор состояния неподвижного потребителя в общем случае состоит из пяти элементов. Он включает три координаты, погрешность шкалы времени и погрешность частоты опорного генератора

$$\vec{\lambda}_k^T = \{x, y, z, \delta T_k, \delta f_k\}.$$

В лаборатории 530 были разработаны программы имитационного моделирования спутниковой системы координатно-временного обеспечения неподвижных потребителей с использованием соотношений, приведенных в учебном пособии [7].

Динамика элементов вектора состояния неподвижного потребителя в дискретном времени описывалась системой стохастических разностных уравнений

$$\begin{cases} X_k = X_{k-1}; Y_k = Y_{k-1}; Z_k = Z_{k-1}; \\ \delta T_k = \delta T_{k-1} + \frac{1-\rho}{\alpha \cdot f_0} \cdot \delta f_{k-1} + \eta_{Tk}; \\ \delta f_k = \rho \cdot \delta f_{k-1} + \eta_{fk}, \end{cases} \quad (2)$$

где $k = 1, 2, \dots, M$ – дискретное время;

$\Delta t = t_k - t_{k-1}$ – шаг дискретизации по времени;

$\rho = \exp\{-\alpha \cdot \Delta t\}$ – коэффициент автокорреляции частотных флуктуаций,

α – ширина энергетического спектра частотных флуктуаций,

f_0 – номинальное значение частоты генератора аппаратуры потребителя.

Вектор $\vec{\eta}_k^T = \{\eta_{Tk}, \eta_{fk}\}$ представляет дискретный белый шум с нулевым математическим ожиданием и дисперсионно-ковариационной матрицей

$$\underline{\Theta}_\eta = \sigma_f^2 \cdot \begin{bmatrix} \Theta_{11} & \Theta_{12} \\ \Theta_{21} & \Theta_{22} \end{bmatrix},$$

причем σ_f^2 – дисперсия частотных флуктуаций, а элементы матрицы $\underline{\Theta}_\eta$ определяются выражениями

$$\Theta_{11} = \frac{2 \cdot \alpha \cdot \Delta t + 4 \cdot \rho - \rho^2 - 3}{\alpha^2 \cdot f_0^2};$$

$$\Theta_{12} = \Theta_{21} = \frac{(1-\rho)^2}{\alpha \cdot f_0}, \quad \Theta_{22} = 1 - \rho^2.$$

В качестве наблюдений использовались как псевдодалности и псевдоскорости, так и их разности по навигационным космическим аппаратам.

Для оценки вектора состояния неподвижного потребителя использовался фильтр Калмана, линейный по состоянию и нелинейный по наблюдениям.

Программы имитационного моделирования спутниковой системы координатно-временного обеспечения неподвижных потребителей позволили оценить влияние уровня случайных и систематических погрешностей исходных измерений, геометрического фактора рабочего созвездия навигационных космических аппаратов, характеристик нестабильности частоты на качество калмановских оценок как координат, так и частотно-временных расхождений.

В процессе исследования задачи координатно-временного обеспечения неподвижных потребителей выяснилась возможность расширения его вектора состояния за счет включения в него зенитной тропосферной задержки сигналов навигационных космических аппаратов. Технология обработки измерений для оценки расширенного вектора состояния неподвижного потребителя опубликована в статье [8]. Хорошие результаты имели место при увеличении минимального количества навигационных космических аппаратов до пяти.

Наибольший интерес представлял вопрос о пространственно-временных полях систематических погрешностей измерений псевдодалностей, их разностей по навигационным космическим аппаратам в регионе. Имитационная модель позволяла исследовать поля систематических медленноменяющихся во времени и в пространстве погрешностей, обусловленных атмосферной рефракцией и неопределенностью в знании векторов состояния навигационных космических аппаратов. Именно эти исследования

легли в основу разработки информационной технологии формирования и использования региональной двойной дифференциальной коррекции, главным образом, кодовых псевдодалностей, их разностей по навигационным космическим аппаратам.

2. Модели и методы региональной двойной дифференциальной коррекции кодовых псевдодалностей, их разностей по навигационным космическим аппаратам

Идея региональной дифференциальной коррекции измерений высказана в докладе на конференции в Санкт-Петербурге в мае 1996 года (Xing-Xiang Jin, Cees D. de Jong. Improvement of DGPS Performance in Medium Areas by Using a Network of DGPS Reference Stations//Proc. 5th International Conf. on DSRNS-96.-St.Petersburg.-1996, May 20). Эта идея сводилась к представлению систематической погрешности измерений псевдодалностей отрезком пространственного ряда Тейлора в окрестности координат главной контрольной станции. В докладе рассматривалась задача на плоскости, причем в детерминистской трактовке.

Для развития данной идеи необходимо было решить задачу синтеза системы формирования корректирующей информации с учетом случайных погрешностей наблюдения на контрольных станциях комплекса. Необходимо было также обобщить задачу на трехмерный случай. Но главная сложность заключалась в разработке имитационной модели радиоэлектронного комплекса региональной коррекции псевдодалностей.

Статистическая трактовка метода региональной коррекции псевдодалностей в трехмерном пространстве в гринвичской геоцентрической системе координат впервые приведена в статьях [9, 10].

Пространственно-временное поле систематических погрешностей измерения кодовых псевдодалностей относительно навигационного космического аппарата с номером j представлялось в точке с гринвичскими координатами x, y, z в момент дискретного времени k в виде

$$\delta\tilde{D}_{kj}(x, y, z) = \delta\tilde{D}_{kj}(x_0, y_0, z_0) + a_{kj} \cdot (x - x_0) + b_{kj} \cdot (y - y_0) + c_{kj} \cdot (z - z_0), \quad (3)$$

где x_0, y_0, z_0 – гринвичские координаты главной контрольной станции; a_{kj}, b_{kj}, c_{kj} – неизвестные параметры, в общем случае зависящие от времени.

Для оценки трех параметров ориентации пространственно-временного поля погрешностей измерения псевдодалностей необходим радиоэлектрон-

ный комплекс из четырех контрольных станций.

Уравнение наблюдения для региональной контрольной станции представляется в виде

$$u_{kji} = \delta\tilde{D}_{kji}(x_i, y_i, z_i) + n_{kji},$$

$i = 0, 1, 2, 3$ – номер контрольной станции.

Данные наблюдения по доступным каналам связи передаются в вычислительный центр комплекса для совместной обработки. Здесь формируются разности по контрольным станциям

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

Уравнение наблюдения для комплекса контрольных станций представляется выражением

$$\Delta\vec{u}_{kj} = \underline{C} \cdot \vec{\lambda}_{kj} + \Delta\vec{n}_{kj},$$

где $\vec{\lambda}_{kj}^T = (a_{kj}, b_{kj}, c_{kj})$ – вектор искомых параметров,

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

Погрешности разностных наблюдений можно полагать гауссовскими с характеристиками

$$\begin{aligned} \langle \Delta\vec{n}_{kj} \rangle &= \vec{0}; \\ \langle \Delta\vec{n}_{kj} \cdot \Delta\vec{n}_{kj}^T \rangle &= \Delta\underline{N}_{kj}, \end{aligned}$$

Методом максимального правдоподобия теперь определяются искомые параметры и анализируется точность полученных оценок [10].

В процессе выполнения исследований приведенная технология получила развитие в нескольких направлениях.

Прежде всего, признано целесообразным проводить предварительную статистическую обработку наблюдений на контрольных станциях в целях ослабления флуктуационных погрешностей измерения кодовых псевдодалностей. Обработка предложена на основе полиномиального сглаживания данных на скользящей выборке конечного объема. В простейшем случае использовался полином первой степени.

Моделирование пространственно-временного поля погрешностей измерения псевдодалностей показало возможность полагать параметры ориентации поля постоянными во времени величинами на интервалах времени длительностью одна-две минуты. Метод максимального правдоподобия при этом позволяет несколько улучшить точность оценок данных параметров. Предложена также технология рекуррентного оценивания данных параметров на основе линейного фильтра Калмана.

В отличие от локальной дифференциальной коррекции измерений, зона действия которой обыч-

но не превышает 10-20 километров, при региональной коррекции потребителю передается погрешность главной контрольной станции, а также вектор параметров ориентации поля погрешностей в регионе. Потребитель определяет полную погрешность измерения псевдодальностей, зная приближенные свои координаты с использованием выражения (3). Наличие двух слагаемых в выражении (3) позволяет назвать региональную коррекцию двойной дифференциальной коррекцией.

Первая версия пакета прикладных программ для имитационного моделирования радиоэлектронного комплекса из четырех контрольных станций разработана А.В. Назаровым и К.В. Иванюком. Для оценки эффективности применения двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей в разработанной модели использовались пункты контроля качества корректирующей информации с известными координатами, на которых измерялись полные погрешности измерения псевдодальностей. Для таких пунктов вычислялись остаточные погрешности измерения псевдодальностей после применения как одиночной, так и двойной коррекции.

Моделирование показало, что применение двойной дифференциальной коррекции оказалось эффективным в конечном итоге не только для оценок координат потребителей, но и для синхронизации пространственно-разнесенных эталонов времени и частоты [11].

В дальнейшем идея двойной дифференциальной коррекции кодовых псевдодальностей была применена для коррекции первых разностей кодовых псевдодальностей по навигационным космическим аппаратам.

Существенное развитие метод двойной дифференциальной коррекции кодовых псевдодальностей получил при использовании квадратичного отрезка пространственного ряда Тейлора для аппроксимации поля погрешностей наблюдения псевдодальностей в регионе

$$\begin{aligned} \delta\tilde{D}_{kj}(x, y, z) = & \delta\tilde{D}_{kj0} + \\ & + a_{kj} \cdot (x - x_0) + b_{kj} \cdot (y - y_0) + c_{kj} \cdot (z - z_0) + \\ & + d_{kj} \cdot (x - x_0)^2 + e_{kj} \cdot (y - y_0)^2 + f_{kj} \cdot (z - z_0)^2 + \\ & + m_{kj} \cdot (x - x_0) \cdot (y - y_0) + n_{kj} \cdot (x - x_0) \cdot (z - z_0) + \\ & + p_{kj} \cdot (y - y_0) \cdot (z - z_0). \end{aligned}$$

Для оценки девяти коэффициентов квадратичного отрезка ряда Тейлора необходим радиоэлектронный комплекс из десяти контрольных станций. Имитационное моделирование такого комплекса с использованием программы, разработанной

В.М. Шевченко, показало, что зона действия двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей значительно увеличивается. При этом такая коррекция эффективна даже при измерениях по навигационным космическим аппаратам с малыми углами возвышения над горизонтом.

Графический анализ поведения погрешностей измерения псевдодальностей во времени и в пространстве в окрестности главной контрольной станции показал целесообразность использования модели вида

$$\begin{aligned} \delta\tilde{D}_{kj}(x, y, z) = & m_{0j} + \dot{m}_{0j} \cdot (k - M) + \\ & + a_j \cdot (x - x_0) + b_j \cdot (y - y_0) + c_j \cdot (z - z_0), \\ & j = 1, 2, \dots, M. \end{aligned}$$

Здесь погрешность измерения псевдодальностей на главной контрольной станции представлена линейным во времени отрезком ряда Тейлора.

При этом в вычислительном центре определяются пять параметров пространственно-временного поля без предварительного нахождения разностей по контрольным станциям. Модель можно обобщить на случай аппроксимации поля погрешностей квадратичными отрезками временного и пространственного рядов Тейлора.

Детальное описание различных моделей пространственно-временного поля погрешностей измерения кодовых псевдодальностей и соответствующих технологий обработки измерений приведено в учебном пособии [13].

Определенный интерес представляет попытка использовать идею двойной дифференциальной коррекции на уровне оценок координат неподвижных потребителей, работающих по одному и тому же созвездию навигационных космических аппаратов. С использованием программы, разработанной С.И. Скуратовским, показано, что это принципиально возможно [14].

В этом случае определяются параметры ориентации плоского пространственного поля по каждой координате в отдельности. При этом используются разности погрешностей оценок координат, определенные на контрольных станциях.

В процессе исследований метода двойной региональной дифференциальной коррекции в радиоэлектронных комплексах из четырех контрольных станций В.Н. Медведевым создана программа поиска наилучшей дислокации четвертой контрольной станции при заданных координатах остальных трех станций.

В качестве критерия оптимальности использовался максимум определителя матрицы \underline{C} .

3. Модели и методы обработки измерений в аппаратуре потребителей и контрольных станций

Одной из важных задач обработки измерений в аппаратуре потребителей и контрольных станций является задача статистической аттестации погрешностей наблюдения [15]. Для решения данной задачи в лаборатории 530, прежде всего, использовалась полиномиальная аппроксимация наблюдений на основе степенных функций Тейлора и ортогональных полиномов Чебышева. Пакет прикладных программ для полиномиальной обработки разработывался многими студентами в процессе выполнения дипломных работ (П.В. Опанасюк, П.А. Павлов и др.). Программы были ориентированы на обработку экспериментальных данных, получаемых с использованием аппаратуры потребителей АСН-16 (А-724 М-01), SvecSix, Navior-14, АСЕ-III. Отличительной особенностью данных программ является повышенное внимание к точностным характеристикам как промежуточных, так и итоговых результатов обработки. Программы содержали также статистический анализ невязок (разностей между исходными данными и оценкой полинома в целом), включая анализ автокорреляционных функций, проверку гипотезы о нормальном распределении плотности вероятности по критериям хи-квадрат, Романовского и Колмогорова.

Для решения задачи формирования дифференциальных поправок на локальных контрольных станциях в реальном масштабе времени использовались линейные полиномиальные фильтры Калмана со скалярным входом и векторным выходом. Скалярный вход представлял собой наблюдаемую погрешность измерения псевдодальности. Уравнение наблюдения представлялось в виде [15]

$$u_k = \vec{d}^T \cdot \vec{\lambda}_k + n_k, \quad k=0,1,2,\dots,M.$$

Вектор $\vec{\lambda}_k$ состоял из искомой поправки и ее первых производных во времени. При аппроксимации изменения поправки во времени полиномом второй степени этот вектор имеет вид

$$\vec{\lambda}_k^T = (\delta a_k, \delta \dot{D}_k, \delta D_k);$$

$$\delta a_k = \left. \frac{d^2 \delta D(t)}{dt^2} \right|_{t=t_k}$$

Вектор \vec{d} в данном случае учитывает наблюдаемость только псевдодальномерной поправки

$$\vec{d}^T = (0, 0, 1).$$

Погрешность наблюдения n_k полагалась гауссовским дискретным белым шумом с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_n^2 . Работа

таких фильтров проверялась как на модельных, так и на экспериментальных данных.

Программы полиномиальной калмановской фильтрации разработаны, главным образом, А.В. Сокольниковым и С.Г. Шаповаловым.

Для решения задачи обработки измерений на контрольных станциях была использована также аппроксимация наблюдений составной последовательностью [16]:

$$u_k = \mu_k + \lambda_k + n_k,$$

где $\mu_k = \sum_{i=0}^p \beta_i \cdot \frac{(t_k - t_M)^i}{i!}; \quad k=1,2,\dots,M,$

$$\lambda_k = \sum_{j=1}^m \gamma_j \cdot \lambda_{k-j} + \varepsilon_k,$$

ε_k, n_k – дискретные белые шумы с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями $\sigma_\varepsilon^2, \sigma_n^2$.

Задача заключалась в оценке параметров

$$\beta_i, \quad i=0,1,2,\dots,p; \quad \gamma_j, \quad j=1,2,\dots,m,$$

а также дисперсий $\sigma_\varepsilon^2, \sigma_n^2$.

Интересно отметить, что применение такой модели оказалось целесообразным и в ряде приложений при оценивании и прогнозировании временных рядов финансово-экономического характера [17].

Особый вклад в развитие учебно-исследовательской базы внес выдающийся инженер и программист В.Н. Медведев, который работал в лаборатории 530 после окончания ХАИ в 2001 году вплоть до июня 2007 года.

В.Н. Медведевым, в частности, создана последняя версия программы полиномиальной обработки временных рядов. Программа написана на языке Object Pascal в среде Borland Delphi 5. Программа позволяет обрабатывать данные с навигационных приемников, а также произвольные временные ряды. Она имеет удобный пользовательский интерфейс и широко используется в лабораторном практикуме.

Следует отметить работы В.Н. Медведева при создании программ обработки измерений кодовых псевдодальностей, получаемых с использованием аппаратуры АСЕ-III. Программы позволяют использовать измерения кодовых псевдодальностей, полные кадры служебной информации с рабочих навигационных космических аппаратов GPS для оценок вектора состояния неподвижного потребителя. Для получения данных оценок в программах применялся метод максимального правдоподобия, а также алгоритм фильтра Калмана. Для обработки использовались, прежде всего, текстовые файлы. После разработки в лаборатории программы конвертации текстовых файлов АСЕ-III в международный формат

RINEX (А.П. Замай) В.Н. Медведев создал новую версию для программ оценки вектора состояния неподвижного потребителя с использованием входных данных в этом формате.

В последнее время В.Н. Медведев разработал новый формат представления измерений и эфемеридной информации, который более удобен при обработке измерений при оценках вектора состояния потребителей уже потому, что измерения теперь сопровождаются мерой их точности.

Медведев В.Н. разработал уникальный пакет прикладных программ по анализу и предварительной статистической обработке файлов в формате RINEX, получаемых с использованием современных геодезических одночастотных и двухчастотных приемников. Кроме того, им создана программа имитационной генерации RINEX-файлов, которые учитывают наличие погрешностей, обусловленных атмосферной рефракцией, многолучевостью, собственными флуктуационными процессами приемника, неточностью знания векторов состояния навигационных космических аппаратов. Наконец, он создал пакет прикладных программ для послесансной обработки кодовых псевдодальностей в радиоэлектронном комплексе региональных контрольных станций. Данный пакет успешно использован на экспериментальных данных, полученных при натурных испытаниях региональной сети контрольных станций в Харьковской области, созданной коллективом специалистов Навигационно-геодезического Центра под руководством А.И. Горба [18].

Заключение

Приведенный краткий обзор основных направлений исследований и некоторых полученных результатов не является полным. Не отражены исследования в области оперативной диагностики тропосферной рефракции по измерениям псевдодальностей, псевдоскоростей, их разностей по навигационным космическим аппаратам. Отмечены далеко не все моделирующие программы и программы обработки экспериментальных данных, в частности, программы обработки относительных (разностных) измерений.

В данном обзоре ничего не сказано о разработке аппаратуры сопряжения приемника системы ГЛОНАСС А-724 М-01 с ПЭВМ, выполненной О.А. Овчинкиным. Не отмечены также эксперименты с аппаратурой контрольного навигационного пункта спутниковой радионавигационной системы ЦИКАДА, два комплекта которой получены в 1991 году при содействии командования Центра управления спутниковыми системами ГЛОНАСС и ЦИКАДА.

Важно в заключение отметить активное участие студентов пятого и шестого курсов в научных исследованиях, в развитии учебно-исследовательской лабораторной базы. Всех их перечислить невозможно. Помимо упомянутых по тексту студентов нельзя не отметить уникальные учебно-исследовательские работы Д.Л. Нагорняка, Р.П. Волощука, М.А. Ломакина, А.В. Мазуренко, Д.П. Жеребятцева, А.Г. Кравчука, Д.В. Февралева, А.В. Токарева, А.К. Задерикина.

Особую признательность следует выразить бывшей старосте 557 группы О.В. Журавской. Благодаря именно ее усилиям в лаборатории появились два комплекта аппаратуры ACE-III (GPS) и вычислительная машина.

В настоящее время лучшие традиции участия студентов в научных исследованиях лаборатории 530 продолжают талантливые студенты пятого курса П.А. Молчанов, А.А. Лисица, В.А. Душепа, Ю.В. Лесик и другие. Они хорошо понимают, что без научных исследований по основному профилю специальности подлинного учебного процесса просто не существует.

Можно сформулировать ряд направлений для дальнейших исследований в области совершенствования информационных технологий применительно к расширенным спутниковым радионавигационным системам. Актуальными по-прежнему являются задачи статистической идентификации и аттестации в прецизионных радиоэлектронных комплексах [19]. Не следует забывать о проблемах совершенствования не только аппаратуры потребителей, локальных, региональных, широкозонных контрольных станций, но и аппаратуры командно-измерительных радиосистем для управления навигационными космическими аппаратами [20].

Литература

1. Хомяков Э.Н. *Радиоэлектронные пространственно-временные системы и комплексы. Введение в статистическую теорию: учеб. пособие* / Э.Н. Хомяков. – Х.: ХАИ, 1993. – 99 с.
2. Хомяков Э.Н. *Радиоэлектронные пространственно-временные системы и комплексы. Оптимальная обработка принимаемых колебаний в радиоэлектронных системах: учеб. пособие* / Э.Н. Хомяков. – Х.: ХАИ, 1994. – 84 с.
3. Хомяков Э.Н. *Применение алгоритма фильтра Калмана к анализу потенциальной точности контроля траектории геостационарного искусственного спутника Земли при использовании спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС* / Э.Н. Хомяков, Д.В. Трикоз // *Спутниковые системы связи и вещания. Перспективы развития в Украине: труды I международной конферен-*

ции UkrSatCom-93, Одесса, 20–24 сент. 1999 г. – С. 791-794.

4. Хомяков Э.Н. Возможности радиоопределения пользователей интегрированной спутниковой системы навигации и связи, использующей ИСЗ на промежуточных и геостационарных орбитах / Э.Н. Хомяков, Д.В. Трикоз, В.С. Кащенко, В.Н. Золотарев // Труды II международной конференции УкрТелеКом-95, Одесса, 19–22 сент. 1995 г. – С. 86-89.

5. Возможности перспективной глобальной навигационно-связной спутниковой системы / Э.Н. Хомяков, Б.И. Макаренко, Д.В. Трикоз, В.С. Кащенко // Радиотехника. – 1996. – №8. – С. 60-64.

6. Хомяков Э.Н. Оптимальное управление снижением и посадкой летательного аппарата с использованием средств расширенной спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС / Э.Н. Хомяков, С.Г. Шаповалов, Е.Э. Наумова // 36. наук. пр. ХВУ. – Вып. 1 (39). – Х.: ХВУ, 2002. – С. 100-106.

7. Спутниковые системы координатно-временного обеспечения неподвижных потребителей: учеб. пособие / Э.Н. Хомяков, Е.Э. Наумова, С.Г. Шаповалов, Д.В. Трикоз. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2000. – 109 с.

8. Хомяков Э.Н. Совместное оценивание вектора состояния неподвижного потребителя и земной тропосферной задержки с использованием сигналов навигационных космических аппаратов GPS / Э.Н. Хомяков, В.Н. Медведев, Е.Э. Наумова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 7(23). – С. 284-293.

9. Метод подвійної диференціальної корекції / О.Е. Наумова, В.М. Романько, Е.М. Хомяков, С.Т. Черепков // Український метрологічний журнал. – 1999. – № 3. – С. 8-10.

10. Пространственно-временная обработка измерительной информации в радиоэлектронном комплексе региональных контрольных станций спутниковых радионавигационных систем / Э.Н. Хомяков, Е.Э. Наумова, Д.В. Трикоз, С.Г. Шаповалов, А.В. Назаров, К.В. Иванюк // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 1999. – Вып. 12. – С. 19-24.

11. Макаренко Б.И. Высокоточная синхронизация шкал времени при использовании двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей в аппаратуре потребителей глобальных навигационных спутниковых систем / Б.И. Макаренко, Е.Э. Наумова // Космічна наука і технологія. – 2001. – Т. 7, № 4. – С. 94-100.

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

13. Хомяков Э.Н. Глобальные навигационные спутниковые системы. Радиоэлектронные комплексы региональных контрольных станций: учеб. пособие / Э.Н. Хомяков, Е.Э. Наумова. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003. – 109 с.

14. Хомяков Э.Н. Двойная дифференциальная коррекция оценок координат неподвижного потребителя в глобальных навигационных спутниковых системах / Э.Н. Хомяков, Е.Э. Наумова, С.И. Скуратовский // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы: материалы II международного радиоэлектронного форума МРФ – 2005, Харьков, 19–23 сент. 2005 г. Том. 2. – С. 509-513.

15. Спутниковые радионавигационные системы. Статистическая аттестация погрешностей местоопределения неподвижного потребителя: учеб. пособие / Э.Н. Хомяков, Д.В. Трикоз, С.Г. Шаповалов, Е.Э. Наумова. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 1998. – 101 с.

16. Статистическая аттестация погрешностей наблюдения на контрольных станциях спутниковых радионавигационных систем GPS, ГЛОНАСС / Э.Н. Хомяков, Д.В. Трикоз, Е.Э. Наумова, С.Г. Шаповалов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1999. – №11. – С. 50-54.

17. Хомяков Э.Н. Статистическая теория идентификации, фильтрации и экстраполяции составных последовательностей и ее приложения: учеб. пособие / Э.Н. Хомяков, Н.Э. Хомякова. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 118 с.

18. Двойная дифференциальная коррекция кодовых псевдодальностей, их разностей по навигационным космическим аппаратам в региональной системе координатно-временного обеспечения потребителей / Э.Н. Хомяков, А.И. Горб, Е.Э. Наумова, В.Н. Медведев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 33. – Х., 2006. – С. 104-115.

19. Хомяков Э.Н. Актуальные задачи развития информационных технологий статистической идентификации и аттестации в прецизионных радиоэлектронных комплексах / Э.Н. Хомяков, Е.Э. Наумова, Н.Э. Хомякова // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы: материалы III международного радиоэлектронного форума МРФ – 2008, Харьков, 22–24 окт. 2008 г. – Т. 1, ч. 1. – С. 299–304.

20. Хомяков Э.Н. Информационно-измерительные системы и комплексы. Командно-измерительные системы для управления космическими аппаратами: учеб. пособие / Э.Н. Хомяков, Е.Э. Наумова. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 101 с.

Поступила в редакцию 3.03.2009

Рецензент: д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник В.В. Пискорж, Научно-исследовательский институт радиотехнических измерений НКА Украины, Харьков.

**СТОХАСТИЧНІ МОДЕЛІ Й МЕТОДИ ОБРОБКИ ВИМІРІВ
У РОЗШИРЕНИХ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМАХ***Е.М. Хомяков, О.Е. Наумова*

У статті приводиться короткий огляд основних напрямків досліджень, виконаних у лабораторії 530 супутникових систем радіонавігації, радіогеодезії й точного часу. Перший напрямок стосується розробки й програмної реалізації оцінки векторів стану споживачів на основі використання фільтрів Калмана. Другий напрямок пов'язаний з розробкою моделей і методів регіональної подвійної диференціальної корекції кодів псевдодальностей, їхніх різниць по навігаційних космічних апаратах, а також подвійної диференціальної корекції оцінок координат нерухливих споживачів. Третій напрямок пов'язаний зі створенням інформаційних технологій обробки вимірів в апаратурі споживачів, на контрольних станціях в інтересах оцінок погрешностей спостереження. Коротко формулюються постановки задач, розглядаються використовувані стохастичні моделі спостережень, векторів стану контрольованих об'єктів, обговорюються методи рішення задач і основні отримані результати. Відзначається активна участь студентів п'ятого й шостого курсів радіотехнічного факультету в наукових дослідженнях лабораторії.

Ключові слова: розширені глобальні навігаційні супутникові системи, вектор стану споживача, фільтри Калмана, навігаційні космічні апарати, регіональна диференціальна корекція.

**STOCHASTIC MODELS AND METHODS OF MEASUREMENT PROCESSING
IN ENLARGED GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS***E.N. Khomjakov, E.E. Naumova*

In article the short review of the basic directions of the researches executed in laboratory of 530 satellite systems of radio navigation, a radio geodesy and true time is given. The first direction is concerned of working out and program realization of an users state vectors estimation on the basis of Kalman filters. The second direction is connected with working out of models and methods for regional double differential correction code pseudoranges, their differences on navigation space vehicles, and also double differential correction of unmoved users coordinates estimations. The third direction is connected with creation of information technologies of measurements processing in user equipment, at control stations in interests of supervision errors estimations. Statements of problems are formulated in brief, used stochastic models of supervision, state vectors of controllable objects are considered, methods of the decision of problems and the basic received results are discussed. Active participation of students of the fifth and sixth courses of radio engineering faculty in scientific researches of laboratory is marked.

Key words: enlarged global navigation satellite systems, user state vector, Kalman filters, navigation space vehicles, regional differential correction.

Хомяков Эдуард Николаевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры 501 Национального аэрокосмического университета «ХАИ», Харьков, Украина, E-mail: Ednikkhom@mail.ru.

Наумова Елена Эдуардовна – канд. техн. наук, доцент кафедры Украинской государственной академии железнодорожного транспорта, Харьков, Украина.