

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В АВИАЦИИ

Рассматриваются некоторые проблемы применения спутниковых радионавигационных систем нового поколения в авиации. Обсуждаются вопросы реализации спутниковой системы посадки, радиоэлектронного комплекса региональной коррекции псевдодальностей. Формулируются предложения в конспективном плане, касающиеся спутниковой системы управления летательными аппаратами

радионавигационные системы, спутниковые радионавигационные системы, спутниковая система посадки, радиоэлектронный комплекс, система управления летательными аппаратами, обработка сигналов

Введение

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) нового поколения GPS, ГЛОНАСС широко используются в мире для решения широкого круга задач. Функциональные дополнения космического и наземного базирования (геостационарные космические аппараты INMARSAT-III, наземные комплексы локальных и широкозонных контрольно-корректирующих станций) существенно улучшили основные тактико-технические характеристики СРНС. В частности, получены уникальные точностные характеристики при координатно-временном обеспечении неподвижных и малоподвижных объектов, при синхронизации шкал времени, что значительно расширило области применения спутниковой радионавигации.

Усиленно ведутся работы по использованию СРНС в интересах авиации [1], а также для контроля траекторий баллистических объектов и околоземных космических аппаратов.

Постановка проблемы

Тем не менее, следует признать, что успехи применения СРНС в интересах авиации представляются менее значительными, чем в других сферах. Частично это объясняется рядом особенностей авиацион-

ных потребителей.

Отметим, прежде всего, высокие динамические характеристики летательных аппаратов при движении как центра масс, так и вокруг центра масс. В авиации резко повышаются требования к точности контроля траектории в реальном масштабе времени, а также к качеству контроля целостности спутниковой системы, ее надежности. Следует отметить также особые задачи военной авиации, в частности, посадку на необорудованные наземными посадочными комплексами полевые аэродромы, групповые полеты, полеты с дозаправкой топлива в воздухе.

Цель статьи

Краткое рассмотрение некоторых проблем авиационной спутниковой радионавигации, в частности, проблемы создания и совершенствования спутниковой системы управления посадкой самолетов, проблемы создания и совершенствования наземного радиоэлектронного комплекса региональных контрольных станций для обеспечения действий авиации в регионе.

Кроме того, представляется целесообразным конспективно остановиться на общей проблеме создания и совершенствования спутниковой системы контроля и управления аэродинамическими летательными аппаратами.

1. Проблемы создания и совершенствования системы управления снижением и посадкой самолета на базе расширенной СРНС

Управление движением аэродинамических летательных аппаратов осуществляется на основе комбинированного программного и корректирующего управления на всех стадиях полета. Для успешного решения задачи управления необходимо:

- построить математическую модель динамики вектора состояния $\vec{\lambda}(t)$ летательного аппарата в виде стохастического дифференциального или разностного уравнения с учетом возмущений траектории полета $\vec{\xi}(t)$,

- построить математическую модель наблюдаемых функций $\vec{u}(t)$ с учетом систематических и случайных погрешностей наблюдения $\vec{n}(t)$,

- решить задачу синтеза оптимальной программной траектории $\vec{\lambda}_0(t)$ и управляющей функции $\vec{U}_0(t)$ при маневре,

- решить задачу синтеза оптимального корректирующего управления $\delta\vec{U}(t)$ для реализации движения по программной траектории.

На последнем этапе большую роль играет радиоэлектронный комплекс контроля траектории и оценки отклонения фактической траектории от программной. Представляет интерес использовать средства расширенной СРНС в качестве основы такого комплекса.

Для анализа основных характеристик спутниковой системы управления снижением и посадкой самолета в лаборатории СРНС ХАИ разработана имитационная модель такой системы [2]. Структура радиоэлектронного комплекса приведена на рис.1. В основе данного комплекса лежит бортовая аппаратура, обеспечивающая:

- прием и обработку сигналов навигационных космических аппаратов (НКА),

- прием и обработку сигналов двух наземных псевдоспутников (ПС),

- прием и обработку сигналов локальной контрольно-корректирующей станции (ЛККС).

Навигационный процессор осуществляет оценку вектора состояния летательного аппарата $\vec{\lambda}_k^T = \{V_{xkl}, V_{ykl}, V_{zkl}, x_{kl}, y_{kl}, z_{kl}\}$ в локальной системе координат. При моделировании системы были рассмотрены экспоненциальные программные траектории: относительно крутая экспонента при снижении и пологая экспонента на этапе посадки. Разностные стохастические уравнения движения в окрестности программной траектории записаны в предположении, что оси летательного аппарата практически параллельны осям локальной системы координат. Это позволяет в первом приближении рассматривать независимо движения продольное, боковое и вертикальное.

В качестве измеряемых функций использованы первые разности по источникам навигационных сигналов кодовых псевдодальностей и фазовых псевдоскоростей (приращений фазовых псевдодальностей за единицу времени). В качестве опорного источника выбран НКА с наибольшим углом возвышения над горизонтом.

При работе по четырем НКА и двум псевдоспутникам вектор измеряемых функций состоит из пяти разностей псевдодальностей и пяти разностей псевдоскоростей.

Оптимальное корректирующее управление целесообразно находить по условию минимума квадратичного критерия качества системы управления

$$E_{k, M} = \left\langle \delta \vec{\lambda}_M^T \cdot F_0 \cdot \delta \vec{\lambda}_M + \frac{1}{M-k} \sum_{i=k}^{M-1} \left[\delta \vec{\lambda}_i^T \cdot Q_0 \cdot \delta \vec{\lambda}_i + \delta \vec{U}_i^T \cdot P_0 \cdot \delta \vec{U}_i \right] \vec{u}_i \right\rangle, \quad (1)$$

где k, i, l – индексы дискретного времени, $k = 0, 1, 2, \dots, M-1$; $l = 0, 1, 2, \dots, i$; $I = k, k+1, \dots, M-1$, F, Q, P – заданные весовые матрицы,

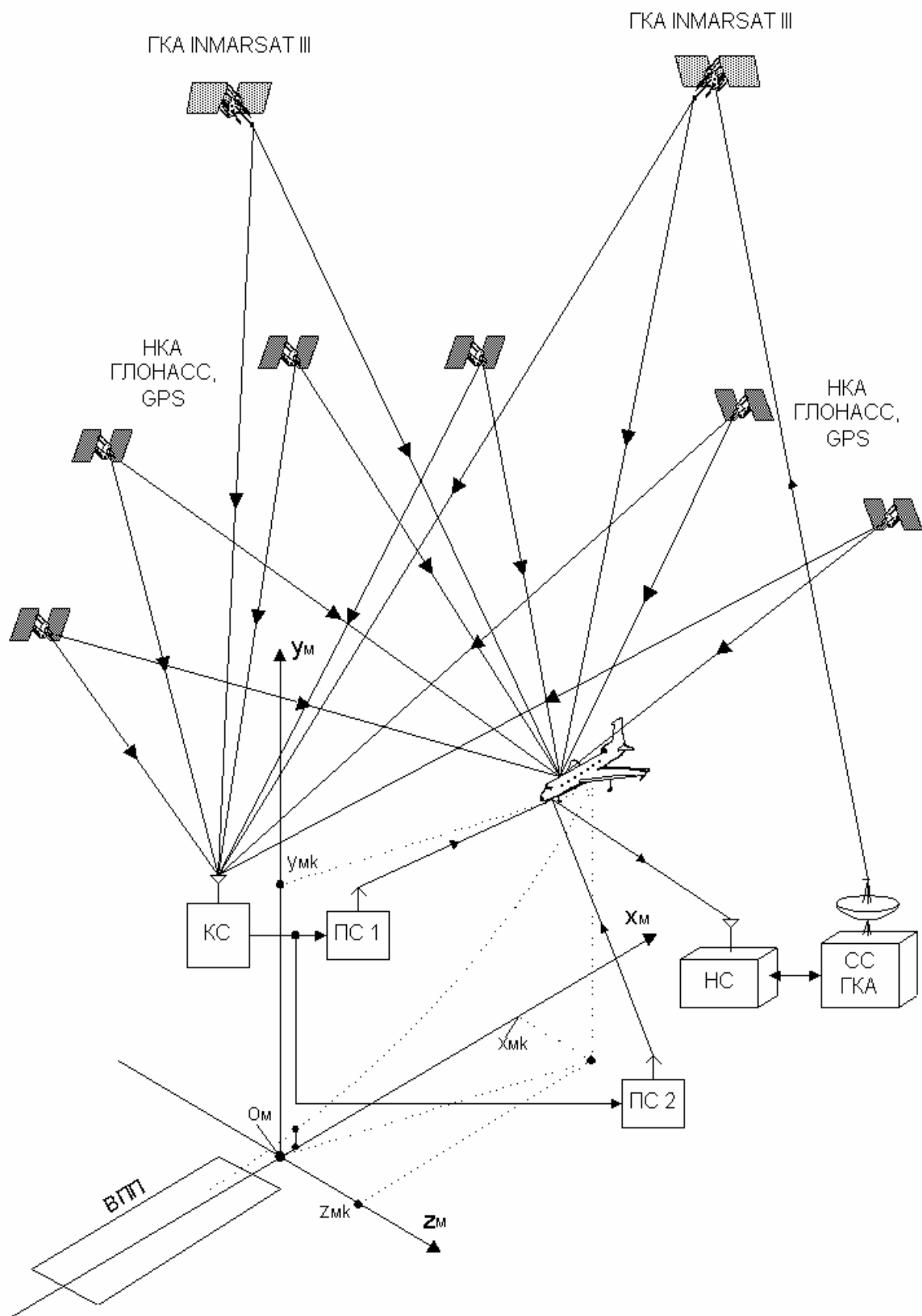


Рис. 1. Радиоэлектронный комплекс управления снижением и посадкой самолета на базе расширенной спутниковой радионавигационной системы

а символ $\langle \cdot | \cdot \rangle$ означает условное математическое ожидание.

Алгоритм управления имеет вид

$$\delta \vec{U}_i = -G_i \cdot \delta \vec{\lambda}_i, \quad (2)$$

где G_i -матрица усиления, вычисляемая в обратном времени ($i=M-1, M-2, \dots, 0$) с учетом весовых матриц F, Q, P , а также переходных матриц по состоянию $\Phi_{i,i-1}$ и по управлению $B_{i,i-1}$,

$\delta \vec{\lambda}_i$ - калмановская оценка отклонения траектории полета от программной.

Моделировалась фактическая управляемая траектория полета в окрестности экспоненциальной глиссады (TSE-Total System Error)

$$\delta \vec{\lambda}_i = \Phi_{i,i-1} \cdot \delta \vec{\lambda}_{i-1} + B_{i,i-1} \cdot \delta \vec{U}_{i-1} + \vec{\eta}_{i-1}, \quad (3)$$

а также находилась калмановская оценка (FTE-Flight Technical Error)

$$\delta \vec{\lambda}_i = \delta \vec{\lambda}_i^* + H_i \left[\vec{u}_i - \vec{R}_i(\vec{\lambda}_i^*, \hat{\lambda}_{sk}) - \delta \vec{n}_i \right], \quad (4)$$

причем,

$$\delta \vec{\lambda}_i^* = (\Phi_{i,i-1} - B_{i,i-1} \cdot G_{i-1}) \cdot \delta \vec{\lambda}_{i-1} \quad (5)$$

с начальным условием $\delta \vec{\lambda}_0 = \delta \vec{v}_0$.

Матрица усиления H_i фильтра Калмана вычислялась с учетом взаимной корреляции случайных погрешностей измерения первых разностей псевдодальностей и псевдоскоростей.

При моделировании наблюдаемых псевдодальностей и псевдоскоростей анализировались систематические погрешности, обусловленные тропосферной и ионосферной рефракцией, и погрешности в знании векторов состояния $\vec{\lambda}_{sk}$ источников навигационных сигналов. В алгоритме (4) корректирующая функция $\delta \vec{n}_i$ находилась на основе данных локальной контрольно-корректирующей станции.

Качество калмановских оценок (4) оценивалось полной погрешностью (NSE-Navigation Sensor Error)

$$\Delta \delta \vec{\lambda}_i = \delta \vec{\lambda}_i - \delta \vec{\lambda}_i,$$

а также среднеквадратическими погрешностями. Наконец, вычислялось минимальное значение критерия качества системы управления как функция дискретного времени k .

Результаты имитационного моделирования спутниковой системы управления снижением и посадкой самолета вскрыли особую значимость задач статистической аттестации случайных факторов, а именно, задач оценки статистических характеристик последовательностей $\vec{\eta}_i, \vec{n}_i$. Необходимо также решать проблему идентификации переходных матриц $\Phi_{i,i-1}, B_{i,i-1}$, существенно влияющих на значения элементов матрицы усиления G_i и на минимальное значение критерия оптимальности $E_{k,M \min}$. Имитационное моделирование позволяет не только выполнить анализ основных тактико-технических характеристик системы, но и обосновать требования к качеству исходной измерительной информации при заданной конфигурации комплекса.

2. Проблемы создания и совершенствования системы региональной дифференциальной коррекции псевдодальностей и псевдоскоростей для обеспечения действий авиации в регионе

Важнейшей задачей наземного обеспечения действий авиации представляется создание радиоэлектронного комплекса среднечастотной региональной коррекции псевдодальностей и псевдоскоростей, измеряемых бортовой аппаратурой спутниковой радионавигации.

Структура такого комплекса приведена на рис.2. Комплекс состоит из главной контрольной станции, из нескольких региональных контрольных станций и передатчика региональной корректирующей информации, причем в качестве передатчика целесообразно использовать средневолновые станции сис-

темы дальней радионавигации «Тропик-Чайка» после соответствующего переоборудования.

Идея такого комплекса [3] заключается в использовании аппроксимации пространственно-временного поля систематических погрешностей измерения псевдодальностей полиномом Тейлора. На сравнительно коротких интервалах времени наблюдения для региона площадью 300*300 кв. км и при работе по НКА с углами возвышения над горизонтом не ниже 15-20 градусов поле погрешностей измерения псевдодальностей аппроксимируется полиномом первой степени

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

где $\delta \tilde{D}_{kj0}$ - погрешность измерения псевдодальности относительно НКА с номером j, определенная на главной контрольной станции с координатами x_0, y_0, z_0 в момент t_k ,

a, b, c – параметры среднезонной региональной коррекции, определяемые в комплексе контрольных станций по измерениям $\delta \tilde{D}_{kj\alpha}$ ($\alpha = 1, 2, \dots, N$), α - номер периферийной контрольной станции.

Для оценки трех параметров a, b, c достаточно главной и трех периферийных контрольных станций, поскольку используются разности

$$\Delta \delta \tilde{D}_{kj\alpha,0} = \delta \tilde{D}_{kj\alpha} - \delta \tilde{D}_{kj0}.$$

Исследования показали [4], что при расширении региона обслуживания и при использовании НКА с возвышениями над горизонтом выше 3-х градусов целесообразна квадратичная аппроксимация пространственного поля погрешностей измерения псевдодальностей. При этом для оценки девяти коэффициентов отрезка ряда Тейлора необходим комплекс из десяти контрольных станций.

В лаборатории СРНС ХАИ разработана имитационная модель радиоэлектронного комплекса региональной дифференциальной коррекции и всесторонне изучены остаточные погрешности измерения

псевдодальностей после двойной дифференциальной коррекции для конкретного варианта дислокации контрольных станций и ряда пунктов контроля качества корректирующей информации.

Моделирование проводилось с учетом использования НКА системы ГЛОНАСС, в которой не предусмотрен режим селективного доступа. Это позволило рассматривать погрешности, обусловленные только тропосферной и ионосферной рефракцией, а также неопределенностью векторов состояния НКА. При этом оказалось возможным оценивать параметры региональной коррекции на интервалах времени порядка двух минут с дискретностью 2с.

О полезности комплекса региональных контрольных станций свидетельствует его практическое использование в системе EUROFIX, а также в Германии и Голландии. Идея региональной коррекции реализуется также рядом фирм, например, Trimble Navigation, Geo++ в рамках концепции виртуальных контрольных станций.

3. Проблемы создания и совершенствования спутниковой автоматизированной системы контроля и управления летательными аппаратами

В последнее время выявилась потребность в усилении роли наземного контроля и управления летательными аппаратами. Речь идет не только об управлении беспилотными летательными аппаратами, но и управлении пилотируемыми объектами в сложной навигационной обстановке.

С целью совершенствования системы наземного контроля и управления представляется целесообразным реализовать радиоэлектронный комплекс с бортовым ретранслятором навигационных сигналов. При этом можно использовать вторые разности кодовых псевдодальностей и псевдоскоростей с оценкой вектора состояния летательного аппарата относительно наземной станции. Результаты независимого контроля траектории могут передаваться на

борт летательного аппарата с использованием той же радиолнии, которая применяется для передачи локальной или региональной коррекции навигационных измерений. Возможно использование и системы спутниковой связи на основе космических аппаратов INMARSAT-III (Рис. 1). В перспективе для передачи измерительной информации и телеметри-

ческой информации в двухсторонней радиолнии «Земля-борт» должны широко использоваться спутниковые системы связи на основе группировки низкоорбитальных и геостационарных космических аппаратов.

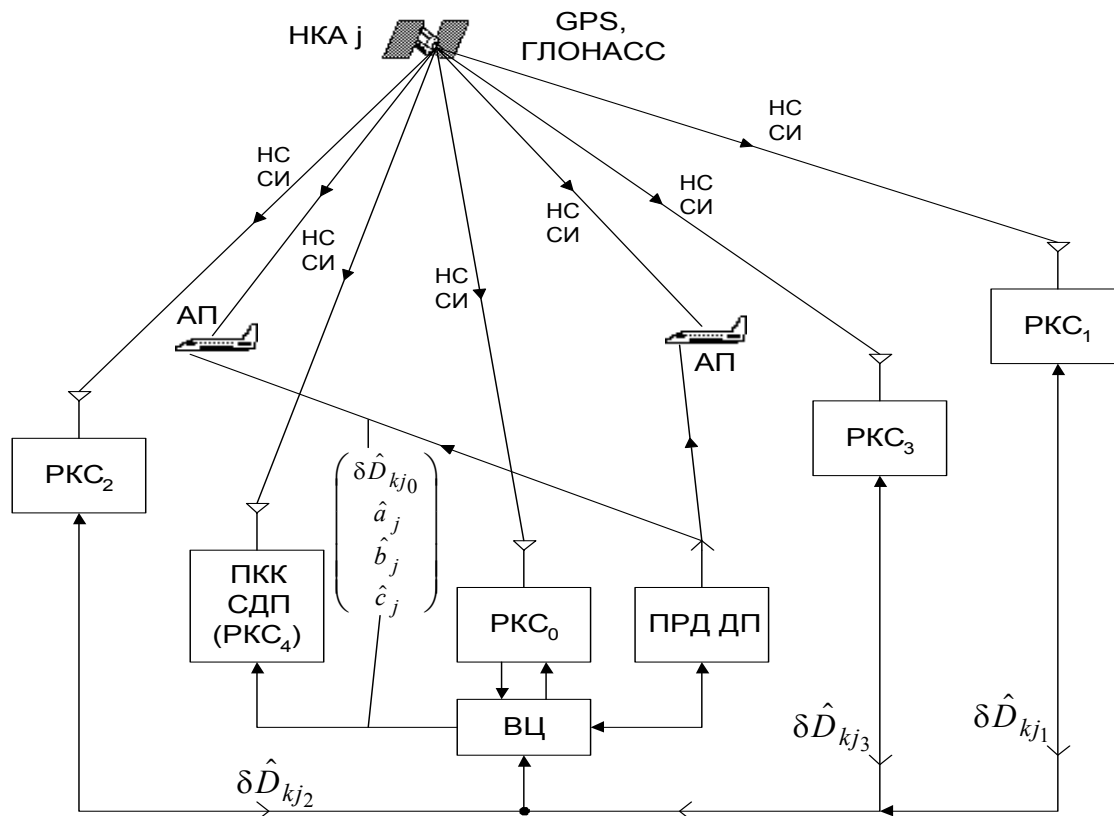


Рис.2. Структура радиоэлектронного комплекса региональной дифференциальной коррекции

Следует более широко в авиации использовать опыт построения автоматизированных систем управления космическими аппаратами, в частности, использовать опыт разработки и создания совмещенных командно-измерительных и телеметрических радиосистем с широкополосными шумоподобными сигналами.

Специфика авиационных приложений убеждает в целесообразности широкого использования многолучевых антенных систем в радиолниях как наземного, так и бортового комплексов управления. Это позволит ослабить влияние многолучевости при кодовых измерениях, а также существенно повысить

энергетический потенциал радиолний в условиях сложной помеховой и динамической обстановки.

Основные выводы и предложения

Обзор проблемных вопросов применения спутниковых радионавигационных систем в авиации позволяет сделать ряд выводов.

Прежде всего, следует отметить возрастающую роль наземного обеспечения спутниковой авиационной радионавигации. Наличие аэродромной локальной контрольно-корректирующей станции и двух псевдоспутников существенно улучшает качество функционирования посадочного комплекса на

базе СРНС. Включение в состав бортовой аппаратуры ретрансляторов сигналов НКА позволяет обеспечить наземный автономный независимый контроль траектории летательного аппарата. Это позволит существенно снизить вероятность ошибки пилотов при наличии устойчивой двухсторонней связи.

Для обеспечения действий авиации в регионе необходим радиоэлектронный наземный комплекс контрольных станций, работающий по принципу двойной дифференциальной коррекции псевдодальностей.

Что касается других предложений по внедрению спутниковой технологии в авиационную радионавигацию, то можно отметить:

- необходимость и целесообразность создания исследовательской летающей лаборатории и исследовательского аэродрома для испытаний образцов контрольных станций, псевдоспутников, программного обеспечения контрольных станций, диспетчерского комплекса автономного контроля траектории летательного аппарата,

- необходимость и целесообразность создания бортовой аппаратуры спутниковой радионавигации с многолучевыми антенными фазированными решетками,

- необходимость и целесообразность создания мобильных контрольных станций, псевдоспутников, диспетчерских пунктов вертолетного базирования.

Литература

1. Шухман Л., Элрод Б.Д., Дж. Ван Дирендонк А. Возможности применения расширенной глобальной навигационной системы в рамках национальной аэронавигационной системы // ТИИЭР. Тем. вып. “ Управление воздушным движением ”.- 1989.- Т. 77, №11.- С. 130-150.

2. Хомяков Э.Н., Шаповалов С.Г., Наумова Е.Э. Оптимальное управление снижением и посадкой летательного аппарата с использованием расширенной спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС, Сборник научных трудов. Вып.1(39). МО Украины, ХВУ, Х, 2002, с.100-106.

3. Xing-Xiang Jin, Cees D. de Jong. Improvement of DGPS Performance in Medium Areas by Using a Network of DGPS Reference Stations. Differential Satellite Navigation System // Proc. 5th International Conf. on DSRNS'96.- St. Petersburg (Russia).- 1996, May 20-24.

4. 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 11.10.03

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Костенко П.Ю., Харьковский институт Военно-Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, г. Харьков