

Алгоритмические методы коррекции навигационных систем летательных аппаратов

77-48211/547962

03, март 2013

Неусыпин К. А., Пролетарская В. А., Алексеева Е. Ю.

УДК 681.513

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

fehu@mail.ru

ekaterina.alekseeva90@gmail.com

Введение.

Успешное решение задач управления летательными аппаратами (ЛА) во многом определяется уровнем развития измерительной техники. Информационные сигналы измерительных систем имеют погрешности, обусловленные конструктивными особенностями и условиями функционирования ЛА. Повышение точности измерительной информации предполагает исследование погрешностей и последующую их компенсацию алгоритмическим путем.

Рассмотрены вопросы повышения точности навигационного комплекса ЛА алгоритмическим путем. В состав навигационного комплекса обычно включают гироскопические системы, различные РЛС и другие навигационные системы и системы ориентации [1, 2]. В соответствии с военными доктринами, принятыми в странах изготовителях ЛА, в состав навигационного комплекса может быть использована система GPS/ГЛОНАСС.

Сигналы навигационных систем являются первоисточниками ошибок при управлении ЛА. Поэтому определение и последующая компенсация ошибок навигационных систем ЛА является важной и актуальной задачей.

В работах, посвященных исследованию указанной задачи, в частности в [1-6], представлены различные алгоритмические методы коррекции, но отсутствует сравнительный анализ этих методов. Цель настоящей статьи – на основе анализа

известных методов алгоритмической коррекции навигационных систем выработать рекомендации по практическому применению методов коррекции навигационной информации ЛА.

1. Навигационные системы летательных аппаратов.

Инерциальные командно-измерительные приборы служат основой построения систем навигации, ориентации и стабилизации большинства современных ЛА.

В составе системы управления ЛА часто используют бесплатформенный инерциальный блок (БИБ), который определяет точность управления и решения поставленных задач.

Преобразование первичных информационных сигналов инерциальных измерителей с целью формирования выходной информации БИБ осуществляется в специализированном вычислителе.

Примерами исследуемых систем являются: КИНД34-052, КИНД34-057 (предназначенные для систем управления средств выведения космических ЛА, транспортных кораблей, спускаемых аппаратов) [3]. Приборы КИНД34-052, КИНД34-057, КИНД11-221 отличаются типами чувствительных элементов. Прибор QUASAR 3000, построенный на волоконно-оптических гироскопах бесплатформенный инерциальный блок типа LCI-1 разработки фирмы Northrop Grumman Litel (США), и др.[3]. LCI-1 выполнен в усечённой конфигурации (IMU) и выдаёт только проекции линейного ускорения и угловой скорости ЛА на связанные с прибором оси. Прибор LCI-1 нерезервирован - в состав прибора входят три гироскопа и три акселерометра.

Платформенные инерциальные навигационные системы (ИНС) успешно конкурируют с БИБ, отличаются достаточно высокой точностью и хорошо отработаны на практике. ИНС, построенные по полуаналитической схеме, могут быть реализованы на базе трех двухстепенных гироскопов или двух трехстепенных гироскопов. Интегрирование сигналов с акселерометров даёт информацию о скорости несущего динамического объекта. Двукратное интегрирование позволяет определить пройденный путь вдоль соответствующих осей.

При построении ИНС, в зависимости от условий применения, используются различные чувствительные элементы. Для построения гиросtabilизированной платформы (ГСП) широко используются поплавковые, электростатические, динамически настраиваемые гироскопы, а также лазерные и другие типы гироскопов [4]. Основными чувствительными элементами ИНС являются акселерометры, которые также имеют различные конструкции. Комбинация чувствительных элементов позволяет получить ИНС с различными свойствами, имеющие разнообразные качественные характеристики.

Например, серийная грубая ИНС типа Ц-060К включает одноосные маятниковые акселерометры, которые установлены на ГСП с индикаторной стабилизацией, реализованной на базе двух динамически настраиваемых гироскопов с внутренним кардановым подвесом. Ц-060К отличается низкой точностью, относительно невысокой стоимостью и хорошо технологически отработана. При необходимости повышение точности таких грубых ИНС обычно осуществляется путем привлечения дополнительной внешней информации от других измерительных систем.

ИНС и БИБ имеют погрешности, обусловленные различными возмущающими факторами [1, 2, 5, 6]. Известные схемы компенсации погрешностей навигационных систем предполагают использование комплексирования с другими измерительными системами, обработку информации с помощью алгоритмов оценивания и прогнозирования [2, 6].

При функционировании ИНС и БИБ в режиме коррекции от внешних измерительных систем обычно используется компенсация погрешностей с помощью алгоритмов оценивания. В автономном режиме работы применяется прогнозирование и последующая компенсация погрешностей в выходном сигнале системы (если автономному режиму работы предшествовал режим коррекции от внешних измерителей)[2].

2. Методы коррекции навигационных систем.

Алгоритмы компенсации погрешностей автономных ИНС за счет внутренних связей системы широко известны [2, 5, 6], применяются и детально разработаны. Вектор измерений в таких алгоритмах формируется на основе сигналов с датчиков углов прецессии. ИНС, снабженные подобными алгоритмами, имеют остаточные погрешности, вызванные различными возмущающими факторами, соизмеримые с погрешностями, которые обусловлены динамическим дрейфом ГСП.

Таким образом, в случае, когда предполагается автономная работа ИНС на всем интервале полета ЛА, используются методы коррекции ИНС посредством только внутренней информации.

Наиболее полная компенсация погрешностей ИНС осуществляется с помощью алгоритмической обработки информации с ИНС и дополнительного внешнего по отношению к ИНС датчика навигационной информации. Компенсация погрешностей в выходной информации системы обычно осуществляется посредством алгоритмов оценивания. Хорошо известный фильтр Калмана теоретически позволяет получить оптимальную оценку вектора состояния системы. В практических приложениях

используются прямые адаптивные модификации фильтра Калмана [1, 2, 5, 6], позволяющие получать нерасходящиеся оценки погрешностей ИНС.

Коррекция ИНС от внешних источников информации с применением различных алгоритмов позволяет существенно снизить погрешности получаемой навигационной информации. В качестве примера использования алгоритмов для коррекции навигационной информации рассмотрим ИНС с внешним источником информации, в качестве которого применяется GPS.

Для наиболее полной компенсации погрешностей в выходной информации необходимо предварительно оценить ошибки ИНС. Оценить ошибки возможно, воспользовавшись алгоритмами оптимального оценивания. Алгоритм оценивания вычисляет все оценки ошибок ИНС, поддающиеся наблюдению.

Входным сигналом для алгоритма оценивания является разность в измерении скорости с помощью ИНС и GPS. Ошибки ИНС составляют вектор состояния системы и включают ошибки по скорости, по углу и дрейф гироскопов, а ошибки GPS представляют собой измерительный шум. После обработки измерений на выходе алгоритма оценивания получаем оценку вектора состояния, т.е. оценку всех наблюдаемых ошибок ИНС. Далее оценка ошибок ИНС алгебраически вычитается из выходного сигнала ИНС, состоящего из достоверной информации о скорости и местоположении ЛА и ошибок ИНС. Тем самым компенсируются в выходном сигнале ошибки ИНС в определении навигационных параметров.

В автономном режиме работы ИНС применяется прогнозирование и последующая компенсация погрешностей в выходном сигнале системы (если автономному режиму работы ИНС предшествовал режим коррекции от внешних измерителей) или методы формирования компенсационных сигналов, основанные на приближенном формировании угловых скоростей ГСП вокруг осей стабилизации как функции соответствующих углов прецессии [2, 5, 6]. Аналогичным образом формируется вектор измерений для алгоритма оценивания при коррекции автономной ИНС [2].

Структурные схемы ИНС, корректируемой от внешней измерительной системы с алгоритмом оценивания (а) и автономной ИНС (б) представлены на рис. 1.

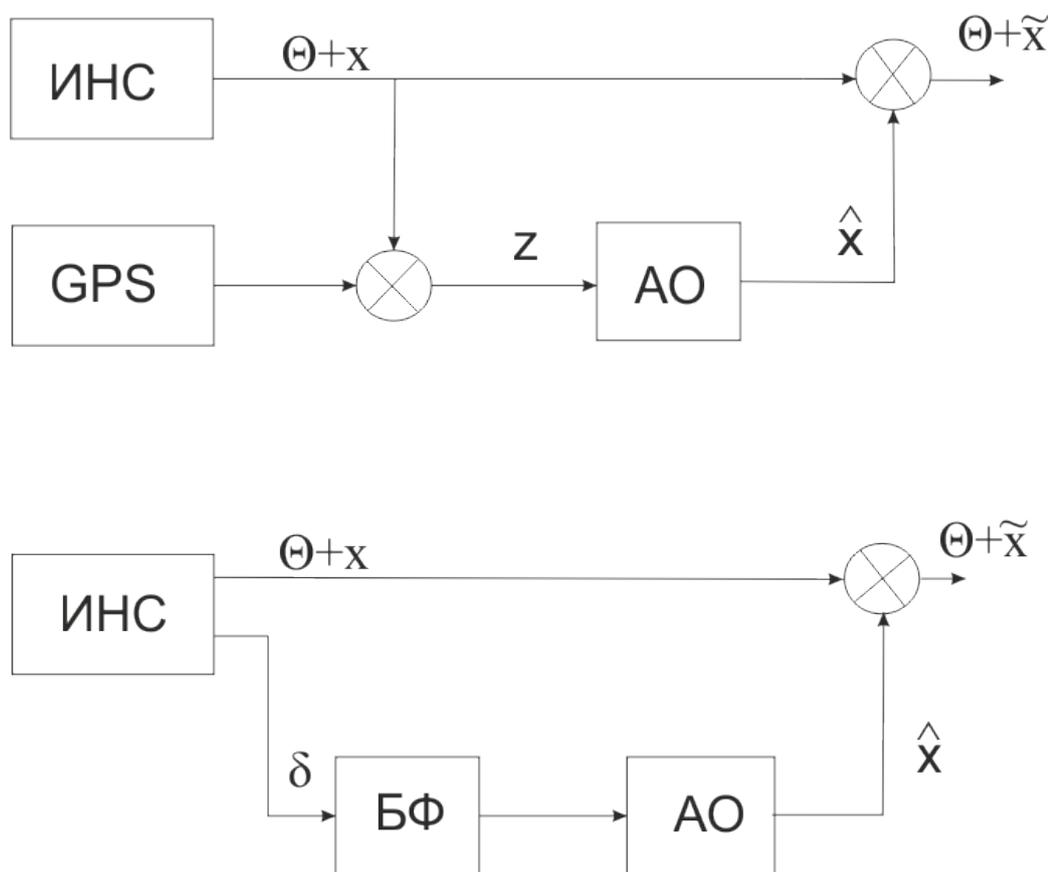


Рис. 1. Структурные схемы коррекции ИНС с алгоритмом оценивания.

Здесь введены следующие обозначения: АО – алгоритм оценивания; БФ – блок формирования измерений; Θ - истинная информация о навигационных параметрах динамического объекта; x – вектор погрешностей ИНС; z - вектор измерений; \hat{x} – оценка вектора x ; δ - сигнал с датчика угла прецессии; \tilde{x} – вектор ошибок оценивания.

Структурная схема ИНС с использованием алгоритма построения модели при отключении внешнего датчика представлена на рис. 2.

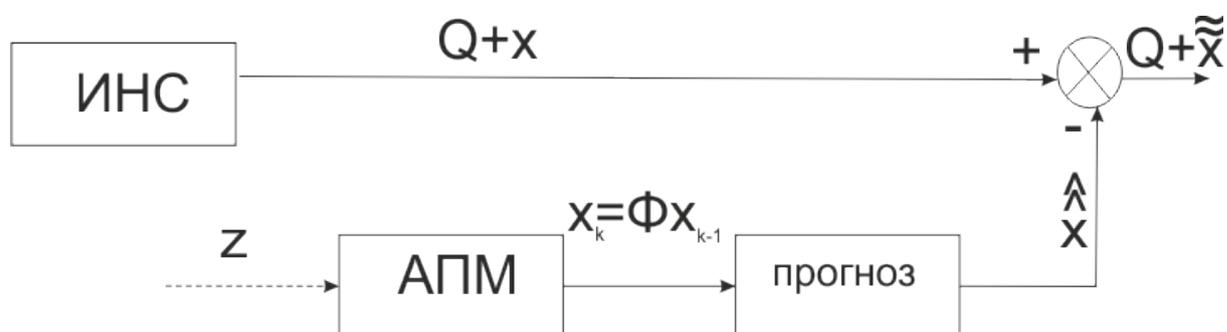


Рис. 2.. Структурная схема коррекции ИНС с алгоритмом прогноза

Здесь АПМ – алгоритм построения модели; Q - истинная информация о навигационных параметрах динамического объекта; Φ – матрица модели погрешностей ИНС; x – прогноз погрешностей ИНС.

В практических приложениях прогнозирование состояния маневрирующего объекта с использованием априорных математических моделей не представляется возможным, поэтому необходимо строить модели в процессе функционирования объекта.

Точность сформированного вектора измерений зависит от погрешностей информации снимаемой с датчиков углов прецессии и от адекватности используемой модели погрешностей ГСП. Повысить точность формирования вектора измерений в схеме коррекции автономной ИНС можно путем построения модели ГСП в процессе функционирования автономной ИНС.

Оценку ошибок ИНС можно использовать в регуляторе для компенсации ошибок по скорости, по углу и дрейфу гироскопов в структуре ИНС, уменьшая тем самым амплитуду колебаний ошибок и улучшая качество переходного процесса.

Исследование измерительного комплекса ЛА показало, что наиболее перспективным методом повышения точности информации о навигационных параметрах и параметрах ориентации является алгоритмический подход. Используемое информационное обеспечение измерительного комплекса ЛА обычно включает алгоритмы управления и оценивания. Алгоритмы управления используются для коррекции измерительных систем, входящих в измерительный комплекс ЛА.

Использование для повышения точности измерительного комплекса ЛА алгоритмов оценивания позволяет проводить коррекцию в выходном информационном сигнале, не вмешиваясь в динамику измерительных систем.

В настоящее время для коррекции измерительного комплекса ЛА обычно предлагается использовать классические алгоритмы оценивания. Как правило, это фильтр Калмана и его различные адаптивные модификации. Однако эти фильтры не позволяют проводить коррекцию измерительного комплекса ЛА, когда сигнал от внешнего источника временно отсутствует. Сигналы спутниковых навигационных систем подвержены воздействиям активных и пассивных помех. Поэтому возможно появление интервалов полета ЛА, когда получать достоверную навигационную информацию не представляется возможным.

В случае отсутствия сигналов от GPS для коррекции ИНС используются другие датчики, например датчики угловых ускорений.

В связи с усложнением задач, которые решаются с использованием навигационных систем,

используется большое количество различных систем и датчиков навигационной информации, что позволяет осуществлять комплексную обработку информации. Совместная обработка информации от нескольких датчиков или систем называется комплексированием.

Навигационные комплексы (НК) представляют собой некоторое количество систем и датчиков, в основу принципа действия которых положены различные физические закономерности. Эти системы объединены алгоритмически.

Традиционной схемой НК является ИНС, принятая за базовую систему, снабженная несколькими датчиками внешней информации, алгоритмами комплексирования и оценивания. Алгоритмы комплексирования представляют собой алгоритмы обработки сигналов от используемых навигационных систем и датчиков [1,2]. Увеличение количества измерительных систем теоретически позволяет с большой точностью получить информацию о навигационных параметрах объекта. На практике же при использовании систем с различными точностными характеристиками и из-за несовершенства алгоритмического обеспечения точность определения навигационной информации снижается. Поэтому с помощью алгоритмов комплексирования выделяются системы, позволяющие получить наиболее достоверную информацию о навигационных параметрах ЛА, или в процессе совместной обработки сигналов с различных систем выделяется наиболее достоверная информация [2].

Структурная схема измерительного комплекса, предусматривающего функционирование базовой системы в автономном режиме, представлена на рис. 3.

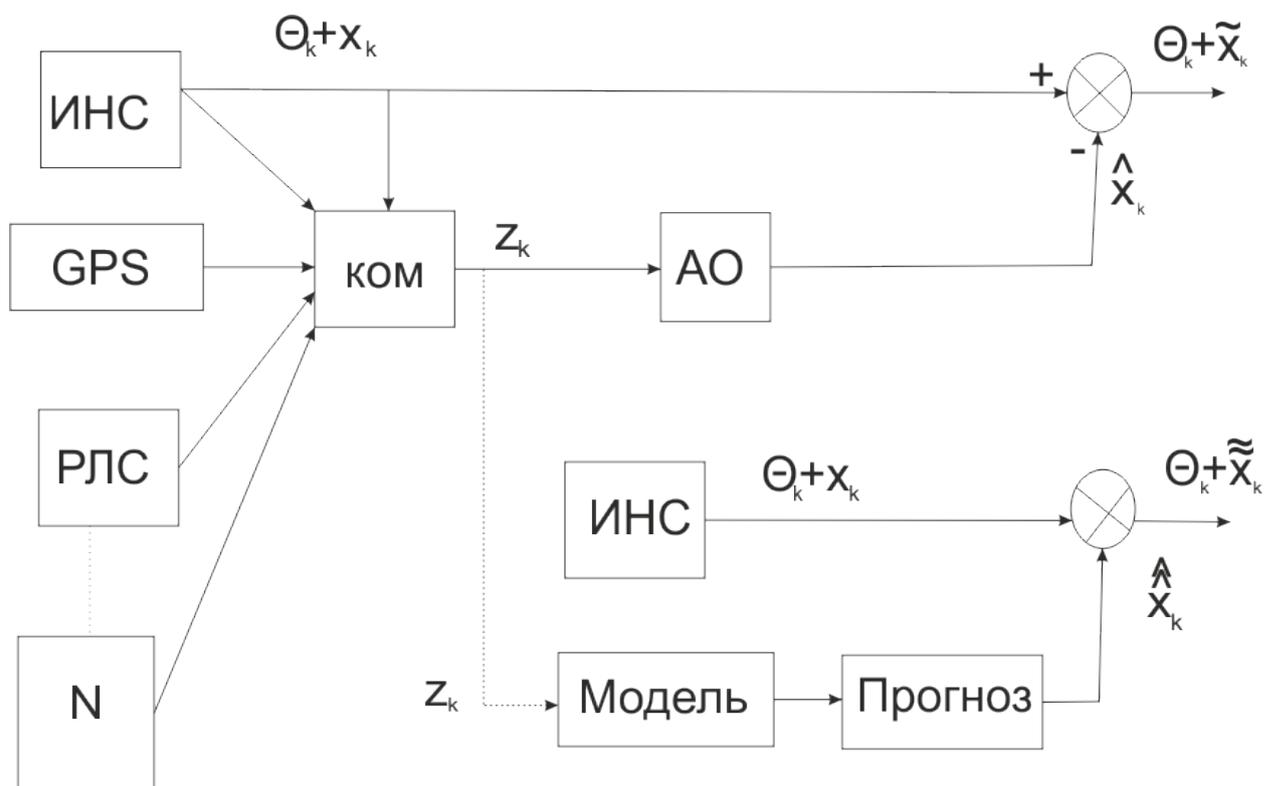


Рис. 3. Измерительный комплекс, функционирующий в режиме коррекции и в автономном режиме.

Здесь θ_k – истинная навигационная информация; x_k – погрешности ИНС; \hat{x}_k – оценки погрешностей ИНС; \tilde{x}_k – ошибка оценивания; $\hat{\hat{x}}_k$ – прогноз погрешностей ИНС; $\tilde{\tilde{x}}_k$ – ошибка прогноза; АО – алгоритм оценивания; БК – блок комплексирования и формирования измерений z_k .

Точность корректируемых ИНС в значительной степени зависит от погрешностей внешнего источника информации и ошибок используемого алгоритма, в частности, от адекватности математической модели погрешностей ИНС.

При функционировании ИНС на длительных интервалах времени без коррекции углы отклонения ГСП нарастают. Следствием этого является неадекватность математической модели реальному процессу изменения погрешностей ИНС. В этом случае применяют коррекцию ИНС в структуре системы посредством алгоритмов управления [2].

Компенсация погрешностей в структуре ИНС, как правило, проводится с помощью адаптивных регуляторов [2]. К недостаткам этого подхода следует отнести высокую чувствительность схемы к ошибкам оценивания погрешностей ИНС.

В условиях, когда источники внешней информации отключены, проводится коррекция навигационных систем с помощью алгоритмов прогноза. С помощью этих алгоритмов осуществляется прогноз погрешностей навигационной системы. Затем спрогнозированные оценки погрешностей используются в известных схемах коррекции [1, 2].

Для повышения точности функционирования ИНС в автономном режиме необходимо построить математическую модель ошибок ИНС, в предшествующем корректируемом режиме, осуществить прогноз ошибок и использовать его в выходной информации для компенсации этих ошибок. Эту задачу целесообразно решать алгоритмическим путем на борту ЛА. Так как этот путь позволяет получить эффект с наименьшими временными и материальными затратами, используя системы современного уровня точности.

Реализация алгоритмов на борту ЛА в БЦВМ накладывает на них специфические требования. Ограничениями являются малый объем машинной памяти, отводимый под реализацию алгоритмов и высокое быстродействие алгоритмов.

Прогнозирующие модели широко используются в схемах коррекции навигационных систем при исчезновении сигналов от внешних измерительных систем. При краткосрочном исчезновении выходных сигналов ИНС, GPS, и других систем обычно используются априорные модели для прогнозирования полезного сигнала. Для ИНС могут быть использованы априорные модели. В условиях длительного отсутствия сигналов от внешних измерителей априорные модели с течением времени становятся неадекватными реальному процессу изменения погрешностей ИНС. Поэтому модели погрешностей ИНС необходимо строить в процессе функционирования ЛА. Методы построения моделей широко известны и отличаются по точности и объему машинной памяти, необходимой для реализации в БЦВМ. Наиболее простыми методами построения моделей являются различные модификации линейных трендов [2]. Более сложные методы позволяют построить высокоточные модели, но требуют большего времени и значительного объема машинной памяти БЦВМ. К таким методам относятся разнообразные нейронные сети, генетические алгоритмы и алгоритмы самоорганизации [7, 8].

Нейронные сети позволяют построить модели исследуемых объектов с достаточно высокой точностью, но требуют при этом длительного времени для реализации процесса ее обучения и получения модели [2].

Работа генетического алгоритма представляет собой итерационный процесс, который продолжается до тех пор, пока не выполнятся заданное число поколений или какой-либо иной критерий останова. Реализация генетического алгоритма [7] требует значительных вычислительных затрат при практически полном переборе возможных решений с заданной точностью. Генетические алгоритмы отличаются высокой точностью, но требуют высокой производительности БЦВМ.

Алгоритм самоорганизации [8], позволяющий построить прогнозирующие модели исследуемого процесса в условиях минимума априорной информации, является одним из перспективных методов построения математических моделей. Метод самоорганизации позволяет автоматически построить модель объекта оптимальной сложности посредством многорядного перебора с использованием ансамбля критериев селекции, заданного разработчиком, используя данные наблюдений с помехами. С помощью разделения выборки наблюдений специальным образом, выбора ансамбля критериев селекции для конкретной задачи, а также реализации процесса искусственного отбора моделей-претендентов, осуществляется построение прогнозирующей модели оптимальной сложности. Построенные методом самоорганизации модели обладают хорошей помехоустойчивостью.

Классический алгоритм самоорганизации реализуется с помощью громоздких процессов отбора, особенно, когда используется полная комбинация моделей-претендентов для синтеза промежуточных моделей. В этом случае резко возрастает требование к вычислительным ресурсам БЦВМ.

Точность нейронных сетей, алгоритмов самоорганизации и генетических алгоритмов в большой степени зависит от качества измерительных выборок. Сигналы с датчиков углов прецессии содержат высокочастотную шумовую помеху. При коррекции ИНС от внешних измерителей в качестве последних используются различные радиолокационные системы, GPS и др. выходные сигналы которых также имеют ярковыраженную высокочастотную случайную помеху. Наличие в измерительных выборках случайных высокочастотных помех и аномальных измерений существенно снижают точность построения моделей. Повышение качества измерительных выборок достигается алгоритмическим сглаживанием измеряемого сигнала. Для этого обычно используются методы предварительной фильтрации [1,5].

Таким образом, перечислены наиболее популярные классические методы построения моделей погрешностей ИНС. С учетом особенностей реализации алгоритмов в спецвычислителе или БЦВМ предпочтение целесообразно отдавать алгоритмам самоорганизации.

Выводы.

Рассмотрены концептуальные способы повышения точности навигационной информации алгоритмическим путем.

1. Для коррекции автономных ИНС целесообразно использовать алгоритмы компенсации погрешностей с использованием информации с датчиков углов прецессии.
2. В корректируемом режиме компенсация погрешностей ИНС осуществляется в выходном сигнале системы с использованием адаптивных алгоритмов оценивания.
3. При использовании на ЛА нескольких датчиков навигационной информации целесообразно осуществлять селекцию измерительной информации с помощью алгоритмов комплексирования.
4. Компенсация погрешностей ИНС в автономном режиме на основе информации, полученной в предшествующем корректируемом режиме, осуществляется в выходном сигнале с помощью прогнозирующих моделей. При краткосрочном прогнозе используются априорные модели и линейные тренды. Для долгосрочного прогноза модели вычисляются на борту ЛА. Получение реализуемых в спецвычислителе или БЦВМ прогнозирующих моделей рекомендовано осуществлять с помощью алгоритмов самоорганизации.

Список литературы

1. **Агеев В.М., Павлова Н.В.** Приборные комплексы летательных аппаратов и их проектирование. – М.: Машиностроение, 1990. – 375 с.
2. **Неусыпин К.А.** Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. – М., Изд. МГОУ, 2009. – 500 с.
3. **QUASAR IRS.** Характеристики для разработки программного обеспечения СУ и управления полётом, Vega Programme, 2002.
4. **Матвеев В.А., Лунин Б.С., Басараб М.А.** Навигационные системы на волновых твердотельных гироскопах. – М.: Физматлит, 2008. - 240с.
5. **Парусников Н.А., Морозов В.М., Борзов В.И.** Задача коррекции в инерциальной навигации. – М.: МГУ, 1982. – 186с.
6. **Кузовков Н.Т., Карбанов С.В., Салычев О.С.** Непрерывные и дискретные системы управления и методы идентификации. – М.: Машиностроение, 1973. – 285с.

7. **Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.** Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2006. – 352с.

8. **Ивахненко А.Г., Мюллер Й.Я.** Самоорганизация прогнозирующих моделей. - Киев, Техника, 1985. – 320 с.