

Список литературы

1. Димон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. - М.:Мир, 1984. - 317 с.
2. Липаев В.В. Тестирование программ. М.:Мир, 1986.- 293с.
3. Шураков В.В. Надежность программного обеспечения систем обработки данных. - М.:Финансы и статистика, 1987. - 271 с.

УДК 531.383

Г.П.Аншаков, С.Н.Егоров

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ КА ДЗЗ

В практике проектирования высокоточных активных систем ориентации КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко используется принцип декомпозиции вращательного движения КА на программное и возмущенное движения, что позволяет исследовать эти движения раздельно. При разработке алгоритмов программного управления в общем случае должны применяться полные нелинейные уравнения вращательного движения КА, но допустимо пренебрегать влиянием малых факторов, вызванных неполнотой априорной и измерительной информации об уравнениях движения и параметрах состояния. При проектировании подсистемы управления возмущенным вращательным движением КА существенным является учет малых, обычно случайных или неизвестных, возмущений, не учтенных при синтезе программного управления. Высокая точность активных систем ориентации позволяет эффективно линеаризовать уравнения вращения КА, исполнительных органов и измерителей в окрестности программного движения. Поэтому для исследования возмущенного движения КА целесообразно применять методы теории линейных динамических систем управления с учетом неопределенности возмущающих воздействий и ошибок измерений.

В системе ориентации КА динамический наблюдатель теории линейных систем соответствует подсистеме определения параметров ориентации, а закон управления - подсистеме управления возмущенным вращательным

движением КА. При этом под параметрами ориентации в широком смысле следует понимать не только кинематические параметры, характеризующие отклонение КА от опорного базиса, но и весь вектор состояния модели вида

$$\dot{x} = Ax + Bu + \xi, \quad (1)$$

включающий помимо координат вектора малого поворота φ отклонения КА от опорного базиса также вариации угловой скорости $\Delta\omega$, обобщенные координаты и скорости упругих агрегатов, параметры состояния формирующих фильтров коррелированных составляющих возмущающих воздействий и ошибок измерения. Поэтому в состав модели (1) в общем случае должны входить линеаризованные кинематические уравнения вращения

$$\dot{\varphi} = -W(\omega_0) \varphi + \Delta\omega, \quad (2)$$

линеаризованные динамические уравнения вращения

$$\Delta\dot{\omega} = G \Delta\omega + \Theta^{-1} (\Delta\mu + \Delta m_u + \Delta m_v + \xi_m) \quad (3)$$

совместно с уравнениями динамики упругих агрегатов

$$\dot{q} = q', \quad \dot{q}' = -J^{-1} (C_{z1} \varphi + D_{z1} \Delta\omega + C_{z2} q + D_{z2} q'), \quad (4)$$

уравнения агрегированной ошибки гиросплатформы

$$\dot{\Delta\varphi} = -W(\omega_0) \Delta\varphi + \delta + v \quad (5)$$

и уравнения формирующих фильтров других коррелированных составляющих ошибок измерений и возмущающих воздействий.

Минимизируемый в теории линейных систем интегральный квадратичный функционал вида

$$q = M \left[\int_{t_0}^{t_1} (x^T R x + u^T S u) dt + x^T(t_1) T x(t_1) \right] \quad (6)$$

достаточно хорошо характеризует качество процесса управления ориентацией. Первое слагаемое с весовой матрицей R учитывает требования по точности ориентации в опорном базисе. Второе слагаемое в подынтегральной функции с весовой матрицей S характеризует мощность сигнала управления, а с учетом операции интегрирования учитывает энергозатраты на поддержание ориентации. Последнее слагаемое с весовой матрицей T характеризует точность терминального управления. В целом функционал (6) объединяет несколько частных показателей, оценивающих качество

ориентации по углам и угловым скоростям, а также затраты энергии на поддержание ориентации в окрестности опорного базиса.

Согласно теореме разделения теории линейных систем подсистема определения параметров ориентации и подсистема управления угловым движением могут разрабатываться независимо по крайней мере в алгоритмической части. На самом деле взаимосвязь в синтезе этих подсистем все же существует. Некоторая зависимость процесса определения ориентации от процесса управления проявляется в том, что возмущающее воздействие ξ в динамических уравнениях вращательного движения КА (3) моделирует ошибку формирования управляющего воздействия, и интенсивность этого шума зависит от мощности управляющего воздействия. При автономном проектировании подсистемы определения ориентации можно использовать данные о мощности управляющего воздействия в аналогичной системе ориентации. Зато оптимальный наблюдатель не зависит от значений весовых матриц R , S и T в функционале (6). Это можно интерпретировать как возможность синтеза алгоритма обработки измерительной информации по критерию наилучшей точности наблюдения каждого параметра состояния независимо от соотношения обычно противоречивых ограничений на допустимую ошибку ориентации и допустимые энергозатраты на управление ориентации.

Что же касается подсистемы управления угловым движением, то ее характеристики инвариантны к процессу определения параметров ориентации только в смысле обеспечения минимума функционала (6) при заданных матрицах R , S и T . В практике проектирования систем ориентации выбор этих весовых матриц неочевиден. Обычно требования к системе ориентации формулируются в терминах требуемой точности ориентации по углам и угловым скоростям при заданных ограничениях на энергозатраты, что не позволяет непосредственно определить значения весовых матриц в (6). В процессе проектирования естественнее рассматривать элементы весовых матриц как множители Лагранжа в задаче на условный экстремум одного из частных показателей качества при ограничениях на остальные и выбирать эти весовые матрицы из условия выполнения заданных ограничений. Допустимые же значения ошибок управления ориентацией при заданных требованиях к общей точности ориентации КА зависят от значений ошибок определения параметров ориентации. В этом смысле синтез подсистемы управления угловым движением зависит от алгоритмов определения параметров ориентации и должен опираться на результаты исследований подсистемы определения ориентации.

Ввиду высокой степени формализации процедуры синтеза регуляторов

в теории линейных динамических систем методы этой теории целесообразно использовать на многих стадиях разработки технических предложений и эскизного проектирования систем ориентации, в том числе и там, где ранее использовались лишь эвристические приемы. Так, при концептуальном синтезе существенно новой системы ориентации вывод о достаточности состава первичных измерителей и управляющих органов для осуществления требуемой ориентации можно сделать на основании анализа наблюдаемости и управляемости в случае стационарной модели по матрицам наблюдаемости и управляемости

$$N = \parallel C^T A^T C^T \dots (A^T)^{n-1} C^T \parallel, \quad U = \parallel B AB \dots A^{n-1} B \parallel \quad (7)$$

или для нестационарной модели по грамианам наблюдаемости и управляемости.

В процессе разработки требований к точности первичных измерителей можно руководствоваться предельно достижимой точностью определения параметров ориентации при изучаемом составе измерителей и оптимальной обработке измерительной информации. Эта точность характеризуется ковариационной матрицей ошибки оптимального наблюдения параметров состояния, которая может быть найдена без синтеза самого алгоритма наблюдения как решение уравнения Риккати вида

$$\dot{Q} = A Q + Q A^T - Q C^T V_{\eta}^{-1} C Q, \quad Q(t_0) = M [x(t_0) x^T(t_0)] \quad (8)$$

Особенно эффективно применение методов теории динамических систем при синтезе алгоритмов обработки измерительной информации в подсистеме определения параметров ориентации. При этом реализация оптимального алгоритма наблюдения (фильтра Калмана) не всегда целесообразна из-за его нестационарности, высокого порядка и необходимости использовать при его синтезе довольно большой объем априорной информации, например, о ковариационной матрице ошибок оценивания параметров состояния в начальный момент времени. Теория систем позволяет синтезировать стационарные алгоритмы наблюдения, асимптотически (при $t \rightarrow \infty$) оптимальные или обладающие заданной динамикой, а также алгоритмы пониженного порядка, и оценить их степень оптимальности сравнением с фильтром Калмана.

Одним из эффективных способов повышения точности систем ориентации является калибровка первичных измерителей, т.е. идентификация их основных погрешностей в условиях нормального функционирования системы с целью последующей компенсации. Так как эти погрешности входят

в состав вектора состояния x модели (I), то возможность калибровки при исследуемом составе измерений следует из наблюдаемости соответствующих компонент вектора состояния. Во многих случаях наблюдаемость калибруемых погрешностей может быть достигнута не за счет расширения вектора измерений, а использованием специальных калибровочных маневров в угловом движении КА. Это позволяет изменить динамическую матрицу объекта наблюдения, которая зависит от программной угловой скорости, что может привести к наблюдаемости ранее ненаблюдаемых параметров состояния.

Выбор калибровочного маневра не сводится к типичным задачам теории линейных динамических систем. Но если маневр и состав измерений выбраны хотя бы из эвристических соображений, то проверку возможности калибровки в процессе изучаемого маневра, синтез алгоритма идентификации калибруемых погрешностей и анализ точности можно провести методами теории линейных динамических систем.

В целом теорию линейных динамических систем можно считать эффективным средством решения широкого круга задач, возникающих на этапах разработки технических предложений и эскизного проектирования систем ориентации КА ДЗЗ.

Г.П. Аншаков, В.А. Мочалов, В.В. Шумский

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ НАБЛЮДЕНИЯ.
ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПРОБЛЕМАТИКА РАЗВИТИЯ

Существующий в настоящее время задел в создании автоматизированных систем управления космическими аппаратами наблюдения (АСУ КАН) народнохозяйственного назначения (НХН) характеризуется высокой динамикой развития их характеристик, соответствующий представлениям разработчика о техническом облике перспективных АСУ КАН, космических аппаратов наблюдения (КАН) и космических комплексов наблюдения (ККН) в целом. Такими характеристиками АСУ КАН, в частности, являются: эффективность процесса управления; оперативность (время реакции); затраты на создание и эксплуатацию; сроки создания; уровень автоматизации; уро