

В.Ф. Губарев, И.А. Лысюченко

Институт космических исследований НАН и НКА Украины, Киев

Нелинейный оценитель состояния по приближенным данным на скользящем интервале

На основе концепции скользящего интервала рассмотрена возможность построения оценителя состояния нелинейной динамической системы, которая содержит неопределенные возмущения на входе и на выходе в измерительных каналах. Использовалась более реалистичная по сравнению со стохастической интерпретация неопределенности в виде произвольных равновозможных реализаций, принадлежащих некоторым ограниченными множествам.

Уравнения нелинейного оценителя состояния были получены с помощью вариационного принципа. На скользящем интервале из уравнений, описывающих динамику системы и измерительные устройства, формировался неотрицательный функционал, минимизирующий элемент которого и выбирался в качестве оценки состояния на скользящем интервале. При построении функционала использовались положительные диагональные матрицы Λ_1 и Λ_2 , которые являлись весовыми по отношению к уравнениям движения и измерений. Анализировался вопрос существования минимизирующего элемента и проблема устойчивости, т.е. непрерывность решения по отношению к вариациям исходных данных. Ключевую роль здесь играли условия наблюдаемости. При этом для рассматриваемых погрешностей в исходных данных ранговых критериев наблюдаемости недостаточно. Потребовалось введение понятия хорошей наблюдаемости, которое фактически сводилось к хорошей обусловленности матриц, которые необходимо было обращать в рассматриваемом методе оценивания.

Минимизирующий элемент находился из уравнений Эйлера и условий трансверсальности на концах скользящего интервала, которые определяли необходимые условия оптимальности рассматриваемого функционала. Тогда оценка состояния определялась из решения двухточечной краевой задачи с постоянно обновляемыми данными на скользящем интервале.

Подробно исследовался линейный случай, для которого установлены условия разрешимости, а сама задача оценивания при дискретной аппроксимации была сведена к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Обусловленность основной матрицы этой системы уравнений определялась свойствами матриц уравнений движения и наблюдения, а также зависели от матриц Λ_1 и Λ_2 и длины скользящего интервала. Правая часть СЛАУ задавалась исключительно данными на скользящем интервале. Значения элементов матриц Λ_1 и Λ_2 вычислялись из уравнений невязок записанных как для уравнений движения, так и наблюдений согласно принципу невязки, применяемому при решении некорректно поставленных математических задач. Это позволило, с одной стороны, получить гарантированную оценку состояния согласованную с погрешностью исходных данных, а с другой – обеспечивать благоприятные условия устойчивости искомого решения.

Решению задачи нелинейного оценивания предшествовала процедура выделения линейной части в уравнениях оценителя состояния и краевых условиях, например, через линеаризацию. Тогда решение нелинейных уравнений осуществлять по классической итерационной схеме, при которой нелинейная часть задавалась как функция времени при подстановке в нее найденного на предыдущей итерации решения. Вычислительные эксперименты показали, что при правильном выборе линейной части приемлемая точность решения достигалась за две-три итерации.

Дальнейшие исследования метода оценивания выполнялись экспериментально на основе численного моделирования. Эксперименты проводились на примере задачи оценивания состояния параметров ориентации космического аппарата на основе уравнений его динамики и измерительного комплекса. В качестве параметров

состояния рассматривались углы Эйлера-Крылова и соответствующие им угловые скорости. Измерения выбирались так, чтобы система была наблюдаемой. Исследовалась зависимость числа обусловленности основной матрицы СЛАУ от указанных выше параметров. Приведены результаты оценивания угловых координат и угловых скоростей для различных реализаций возмущений. Проведен сравнительный анализ ошибок оценивания для нелинейных и аппроксимирующих линеаризованных уравнений. Показано, что наибольший эффект учета нелинейностей проявляется при отсутствии возмущений. По мере роста уровня возмущений разница между получаемыми оценками стирается, т.е. нелинейный оценщик состояния наиболее эффективен при малых погрешностях исходных данных. Устойчивость разработанных алгоритмов проверялось методом Монте-Карло, который при большом количестве испытаний давал устойчивые гарантированные оценки.