

	u_1	u_3	u_4	u_9	u_{12}	u_8	u_{16}	u_{13}	u_{14}	u_{17}	u_5	
x_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
x_2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
x_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3
x_4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
x_5	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	3
x_6	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	3
x_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
x_8	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	
x_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
x_{10}	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	

В конечной матрице выпишем ребра, соответствующие первым $\rho(G)$ столбцам $\{u_1, u_3, u_4, u_9, u_{12}, u_8, u_{16}, u_{17}, u_{13}\}$. Для исходного графа (рис.1), дерево, построенное на выделенных ребрах, представлено на рис.2. Суммарная весовая функция ребер этого дерева равна 15.

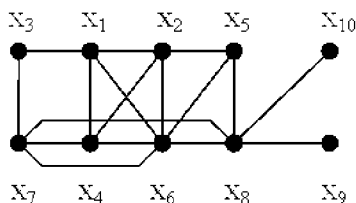


Рис.1. Исходный граф

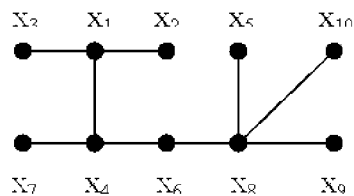


Рис.2. Дерево, построенное на выделенных ребрах

В заключение отметим, что описанный метод распространяется на мультиграфы и может найти широкое применение в проектировании инженерных сетей. Алгоритм не требует проверки появления циклов на каждом шаге, что характерно для большинства существующих методов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зыков А.А. Основы теории графов. – М.: Наука, 1987. – 384 с.

Н.Ш. Хусаинов

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОНОМНОГО КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ДЛЯ БОРТОВОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ РАДИОНАВИГАЦИИ

Обзор известных подходов к контролю целостности системы радионавигации. Под *достоверностью* навигационной информации понимается способность навигационной системы (устройства) поддерживать с заданной вероятностью свои характеристики в требуемых пределах [1]. Главной составной частью достоверности навигационных измерений является целостность навигационной системы, под которой обычно понимается способность обнаружить недопустимое ухудшение в работе системы с заданной вероятностью и временем запаздывания (от момента начала неправильного функционирования или доступа к системе до момента его обнаружения). Требования по значениям вероятности обнаружения и времени запаздывания определяются областью применения системы навигации, в

частности для авиационных применений вероятность обнаружения ошибки должна быть не ниже 0,999 [2].

Под отказом навигационного устройства понимается такое его состояние, при котором использование радионавигационных параметров, определяемых по сигналу от данного устройства, ухудшает точность определения координат до значения, превышающего заданный порог.

Ситуации, связанные с нарушением целостности РНС, обычно приводят к недопустимости использования информации об измеренной дальности до радиомаяка (радиомаяков). В зависимости от сложности обнаружения эти ситуации можно классифицировать следующим образом [1]:

а) *легко обнаружимые ситуации*, которые проявляются в отсутствии сигнала от радиомаяка или в искажении структуры сигнала, не позволяющем установить контакт между приемником и РМ. Эти случаи не требуют использования какого-либо дополнительного оборудования или вычислительных затрат для обнаружения и идентификации отказавшего РМ, в том числе средствами автономного контроля целостности;

б) *трудно обнаружимые ситуации*, которые проявляются в возникновении недопустимых по величине ошибок определения координат ЛА при использовании в расчетах измеренных дальностей до радиомаяка (т.е. существенные искажения измеренной дальности от ЛА до РМ вследствие наличия шумовых или импульсных помех высокой интенсивности, а также несанкционированного перемещения РМ). Разработка алгоритмов автономного обнаружения подобных ситуаций и формирования требований по степени вводимой избыточности в группу РМ является одной из ключевых проблем при проектировании системы навигации.

Решение задачи автономного контроля целостности основано на введении избыточности в навигационную схему – установке одного или нескольких дополнительных радиомаяков сверх минимального числа, необходимого для решения навигационной задачи.

Для контроля целостности системы навигации может применяться ряд подходов.

1) Контроль радиомаяка средствами аппаратуры самого устройства, например, при включении (самоконтроль) или средствами наземного пункта управления РНС путем периодического тестирования работоспособности РМ. В первом случае усложняется структура сигнала и появляются дополнительные временные задержки между моментом активации радиомаяка и моментом передачи первой порции информации бортовому приемнику АСРН. Во втором – необходимы дополнительные задержки на передачу информации о неисправности РМ от пункта управления АСРН на борт ЛА, что не всегда является возможным.

2) Автономные методы контроля целостности условно подразделяются на внешние и внутренние. Внешние методы основаны на избыточной информации, получаемой от других навигационных устройств и систем, имеющихся на борту ЛА (высотомера, ИНС, системы спутниковой навигации и т.п.). Разработка алгоритмов комплексирования информации (в т.ч. избыточной) от различных навигационных систем и устройств в рамках бортового приемника системы навигации и реализация алгоритмов контроля целостности должна выполняться с учетом специфики и набора оборудования каждого конкретного ЛА.

Внутренние автономные методы основаны только на избыточности навигационного поля, т.е. на использовании количества РМ больше минимально необходимого для вычисления координат ЛА. Данные методы делятся на методы оценок и фильтрационные методы. Первые позволяют принять решение о целостности на

основе анализа информации, полученной в некоторый момент времени. Фильтрационные методы базируются на накоплении статистики за некоторый интервал времени и поэтому вносят начальную задержку.

Отказы, связанные с неработоспособностью РМ или сильной искаженностью (зашумленностью) измеряемой дальности, могут быть выявлены и изолированы алгоритмами предобработки (первичной обработки) информации, без использования методов вычисления координат ЛА. Для определенности в дальнейшем отказы такого рода будем называть *аппаратными отказами РМ*. Отказы, требующие для своего обнаружения и/или изоляции решения навигационной задачи в условиях избыточности информационной схемы, будем называть *логическими отказами РМ*. Предлагаемый в данной работе алгоритм обнаружения и/или изоляции логических отказов основан на использовании моментальных оценок.

Методы оценок предполагают сбор и обработку информации в один и тот же момент времени об измеренных дальностях до группы навигационных приборов (радиомаяков), которая характеризуется избыточностью информационного поля. Значительный теоретический вклад в разработку алгоритмов автономного контроля целостности (Receiver Autonomous Integrity Monitoring, RAIM) был внесен в связи с появлением и широким распространением систем спутниковой навигации вследствие автономности функционирования и проблематичностью обслуживания и замены навигационных устройств. Схема контроля целостности не является стандартизованным элементом спутниковой навигационной системы и может реализовываться различными способами в приемопередатчиках разных производителей. В связи с этим следует отметить ряд отличительных особенностей большинства известных RAIM-алгоритмов.

1) При решении навигационной задачи для спутниковых систем навигации кроме трех координат ЛА (X, Y, H) вычисляется величина расхождения показаний времени приемника и группы навигационных устройств (спутников), т.е. решается система уравнений с четырьмя неизвестными. Поэтому минимальное число навигационных устройств, используемое для определения координат ЛА, равно четырем. В рамках разрабатываемой системы АСРН вычисляются лишь координаты ЛА (X, Y, H), поэтому минимальное количество навигационных устройств (радиомаяков) равно трем.

2) Анализ печатных и электронных источников, посвященных проблеме автономного контроля целостности, показал, что рассматриваемые в них алгоритмы обнаружения и изоляции отказа ориентированы на работу в условиях отказа не более одного навигационного устройства. Во многом это объясняется относительно высокой надежностью навигационных устройств (интервал времени между двумя "легковосстановимыми отказами" составляет около 10 мес.) [1].

Формирование оценок вероятностей одиночных и множественных отказов для конфигурации РМ. В соответствии с ГОСТ 27.002, под отказом понимается событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния изделия. В данном контексте изделие – это радиомаяк. Опыт показывает, что для внезапных отказов обычно справедлив экспоненциальный закон распределения вероятности отказов. Соответственно надёжность определяется как вероятность того, что изделие продолжит функционировать в течение определённого времени t и вычисляется с помощью следующего экспоненциального уравнения:

$$R(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}}, \quad (1)$$

где $MTBF$ (Mean Time Between Failure) – среднее время наработки на отказ, указывается в спецификации изделия. $R(t)$ является вероятностью отказа изделия за интервал времени t (со значением между 0 и 1).

Зная значения вероятности отказа одного изделия (радиомаяка) за период времени, можно оценить вероятность одиночного и многократного отказа, а также вероятность отсутствия отказов за период времени.

Поскольку наличие или отсутствие отказа каждого РМ фактически представляет собой бинарное значение (флаг), а набор флагов для всех РМ конфигурации – бинарный вектор размерностью N , то воспользуемся следующей статистической гипотезой, применяемой при теоретических исследованиях процесса возникновения ошибок при передаче слов данных по каналам связи: в каждом разряде вектора ошибки единица появляется с вероятностью P независимо от того, какие значения получили остальные разряды вектора ошибки.

Этой гипотезе наиболее соответствует биномиальный закон распределения кратности ошибки, в соответствии с которым вероятностью того, что при функционировании схемы АСБРН в бинарном векторе длины N возникнет ошибка кратности q , равна:

$$P_{N,q} = C_N^q P^q (1-P)^{N-q}. \quad (2)$$

Если в качестве вероятности P подставить вероятность отказа изделия $R(t)$, то можно получить кривую вероятности отказа кратности q (числа отказавших РМ) в группе из N РМ за интервал времени t .

Проведенный анализ показал, что использование схемы автономного контроля целостности может увеличить продолжительность периода вероятной работоспособности радиомаяковой схемы АСРН в ~2-3 раза (в зависимости от степени избыточности информационной схемы).

Этапы реализации автономного контроля целостности АСРН. Для реализации автономного контроля целостности АСРН в работе предлагается последовательное использование следующих способов оценки и анализа измеренных дальностей от ЛА до РМ.

Первый этап – анализ аппаратного отказа РМ (работает/не работает). Выполняется на основе оценки факта наличия или отсутствия сигнала от каждого РМ наземной схемы АСРН. Наиболее простой способ анализа работоспособности РМ и контроля целостности системы в целом.

Второй этап – независимый фильтрационный анализ каждой измеренной дальности от ЛА до РМ с целью повышения сглаживания измеренных дальностей (уменьшения влияния шумов измерений) и отсека импульсных помех. Данный подход требует накопления некоторой начальной статистики, поэтому "выдача" первой дальности до РМ происходит с некоторой задержкой (последующие дальности до этого же РМ выдаются без задержки).

Третий этап – проверка дальностей до каждого РМ на попадание в границы пространственного региона, для которого на борту имеется полетное задание.

Четвертый этап – обнаружение и изоляция отказавших РМ, измеренные дальности до которых попадают в область решения (незначительная ошибка вследствие логического отказа РМ), но их использование может привести к существенной ошибке вычисления координат ЛА.

Далее будем рассматривать алгоритм автономного обнаружения и изоляции отказов по моментальным оценкам измеренных дальностей до группы РМ.

Базовый бортовой алгоритм обнаружения факта отказа для подгруппы из четырех РМ. Пусть радиомаяки, используемые для решения задачи, образуют

конфигурацию из N навигационных устройств. При этом будем обозначать каждый маяк через R_1, R_2, \dots, R_N . Суть алгоритма контроля целостности заключается в многократном решении навигационной задачи на основе измеренных дальностей D_i различных подгрупп радиомаяков, входящих в общую конфигурацию, пересчете дальностей \hat{D}_i до каждого РМ на основе вычисленных координат ЛА и последующем сравнении этих дальностей с некоторым граничным значением, рассчитанным при моделировании в наземной части системы. Количество радиомаяков в подгруппе будем обозначать через P ($P \leq N$), а сами маяки – $R_{s1}, R_{s2}, \dots, R_{sP}$. При этом

$$\{R_{s1}, R_{s2}, \dots, R_{sP}\} \in \{R_1, R_2, \dots, R_N\}, \quad s_i \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad \forall s_i, s_j: s_i \neq s_j.$$

Предлагаемый подход к решению задачи контроля целостности основан на использовании базового алгоритма для контроля целостности подгруппы из $P=4$ РМ:

Шаг 1. По измеренным дальностям $\{D_{s1}, D_{s2}, D_{s3}, D_{s4}\}$ вычисляются оценочные координаты ЛА $(\hat{X}, \hat{Y}, \hat{H})_{ЛА}$. По полученным координатам ЛА и известным координатам РМ рассчитываются (прогнозируются) дальности до каждого из РМ подгруппы: $\{\hat{D}_{s1}, \hat{D}_{s2}, \hat{D}_{s3}, \hat{D}_{s4}\}$.

Шаг 2. Оценка целостности выполняется с использованием критерия H_i , вычисленного для каждого РМ при статистическом моделировании в наземной части АСБРН. Алгоритм возвращает булевское значение – флаг отказа (ФО):

$$\text{Если } \exists s_j (j=1, 2, \dots, P): |D_{s_j} - \hat{D}_{s_j}| > H_{s_j}, \text{ то}$$

вернуть $\text{ФО}=1$ (отказ обнаружен);

иначе

вернуть $\text{ФО} = 0$ (отказ не обнаружен).

Приведенный 4-маяковый базовый алгоритм контроля целостности позволяет обнаружить факт отказа внутри подгруппы из 4-х маяков при отказе единственного РМ (кратность отказа q равна 1), но не позволяет изолировать (идентифицировать) его. В случае, если внутри подгруппы имеется более одного отказавшего РМ ($q > 1$), то обнаружение факта отказа в общем случае невозможно, поскольку ошибки измерения дальностей вследствие отказов РМ могут накладываться друг на друга.

Данный базовый алгоритм может использоваться как самостоятельный алгоритм контроля целостности (если конфигурация включает только четыре РМ), а также как элемент более сложной схемы контроля целостности, рассмотренной ниже (если конфигурация включает более четырех РМ).

По аналогии с алгоритмами декодирования помехоустойчивых кодов, можно говорить, что алгоритм контроля целостности может работать в трех взаимоисключающих режимах:

- ◆ режим обнаружения отказа;
- ◆ режим изоляции отказа;
- ◆ режим одновременного обнаружения и изоляции отказов.

Минимально необходимое количество N РМ в конфигурации для обнаружения отказов кратности не выше q по приведенному выше алгоритму можно оценить как

$$N = q + 3. \quad (3)$$

Минимально необходимое количество N РМ в конфигурации для изоляции отказов кратности не выше q по приведенному выше алгоритму можно оценить как

$$N = 2 * q + 3. \quad (4)$$

Минимально необходимое количество N РМ для изоляции отказа кратности не выше q и обнаружения отказа кратности не выше $(q+1)$ можно оценить как

$$N = 2 * q + 4. \quad (5)$$

Принципы построения и функционирования бортового алгоритма обнаружения и изоляции отказов. В основу алгоритма контроля целостности АСРН при $N > 4$ положена схема переборных подгрупп, состоящих из $P=4$ РМ и формирование результата контроля на основе совместного анализа полученных ответов для подгрупп. При этом особое значение имеет оценка числа "четверок", в которых отказ был обнаружен или не обнаружен. Полученные оценки числа комбинаций могут быть использованы при принятии решения о наличии факта отказа в разработанной схеме автономного контроля целостности.

Для этого необходимо учитывать следующие положения:

- ◆ "четверка", не содержащая ни одного отказавшего РМ, возвращает $\Phi O=0$;
- ◆ "четверка", содержащая ровно один отказавший РМ, возвращает $\Phi O=1$;
- ◆ значение ΦO , возвращаемого "четверкой", в которую входят более одного отказавшего РМ, заранее непредсказуемо: $\Phi O="U"$ (естественно, что во время работы бортовой части не может быть неопределенных значений флага отказа: каждая "четверка" с $\Phi O="U"$ реально будет оценена по базовому алгоритму контроля целостности либо как "четверка" с $\Phi O=1$, либо как "четверка" с $\Phi O=0$).

Алгоритм заключается в сопоставлении количества четверок, для которых получены значения $\Phi O=1$ и $\Phi O=0$ и формировании вывода о наличии отказа кратности q и возможности его изоляции (с учетом степени избыточности информационной схемы).

Методика и результаты проведения экспериментальных исследований с использованием разработанного алгоритма автономного контроля целостности. Для оценки работоспособности алгоритма автономного контроля целостности использованы конфигурации с различным количеством радиомаяков. Обеспечение работоспособности АСРН при отказе одного или нескольких РМ осуществляется за счет использования бортовым алгоритмом информации из дерева отказов, формируемого наземной частью АСРН в процессе моделирования. Целью проведения экспериментов является проверка работоспособности алгоритма контроля целостности для конфигурации с заданным числом радиомаяков N ($N=4 \div 7$) при отказах различной кратности и различных уровнях искажения измеренных дальностей от ЛА до РМ.

В данных экспериментальных исследованиях моделью бортовой части АСРН имитируется логический отказ РМ. Моделирование ситуации логического отказа осуществляется следующим образом:

- ◆ с заранее определенной вероятностью отказа (она принимается одинаковой для всех РМ) при статистическом моделировании в каждом опыте генерируется флаг выхода из строя каждого РМ (генерация выполняется для каждого РМ независимо);
- ◆ если флаг выхода из строя РМ установлен, то на измеренную (с учетом ошибки радиодальномера) дальность до этого РМ накладывается (прибавляется или отнимается) дополнительная ошибка, величина которой задается перед началом моделирования как процент от величины измеренной дальности.

На основании проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы по разработанному алгоритму контроля целостности:

- ◆ Алгоритм продемонстрировал ожидаемые качественные характеристики (в рамках своей обнаруживающей и изолирующей способностей) во всех режимах (при ошибках измерения дальности более 1% и при фиксированном уровне ошибок исходных данных). Эти показатели находятся на уровне результатов, приводимых в технической литературе по обнаружению отказов в спутниковых навигационных системах.
- ◆ В значительном проценте случаев (при ошибках измерения дальности более 5%) алгоритм позволяет обнаруживать/изолировать отказы большей кратности, чем те, которые теоретически позволяет обнаруживать/изолировать избыточность информационной схемы. Это свидетельствует об имеющемся запасе по надежности обнаружения/изоляции отказов при использовании предложенной схемы контроля целостности.
- ◆ Несмотря на довольно высокую трудоемкость алгоритма, обусловленную необходимостью перебора "четверок" для обнаружения/изоляции отказа, моделирование решения навигационной задачи моделью бортовой части АСРН для одного теста (одной точки) с использованием разработанной программной модели составляет в наиболее трудоемком рассмотренном случае (при конфигурации на 7 РМ) порядка 30 мс. Использование специализированной аппаратной базы (DSP-процессоры, нейропроцессоры), как ожидается, позволит выполнять реализацию приведенной схемы в режиме реального времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Под ред. В.Н.Харисова, А.И.Перова, В.А.Болдина. – М.: ИПРЖР, 1999.
2. Межгосударственная радионавигационная программа государств-участников Содружества Независимых Государств на 2001-2005 годы. Концепция развития радионавигационных систем. Утверждена решением Экономического совета Содружества Независимых Государств от 16 марта 2001 года.

В.А. Жорник, Ю.А. Прокопенко, А.А. Рыбинская, П.А. Савочка

РОСТ ДИСКООБРАЗНЫХ ТРЕЩИН В СПЛОШНОМ ЦИЛИНДРЕ ПРИ НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТЬ

В процессе нанесения упрочняющих и восстанавливающих покрытий на рабочую поверхность деталей машин они довольно часто подвергаются тепловому воздействию. Это приводит к высоким нестационарным температурным градиентам и, как следствие, к термоупругим напряжениям, которые, усиливаясь вблизи трещиноподобных дефектов, способствуют их росту. Таким образом, упрочнение рабочей поверхности детали может привести к значительному уменьшению прочности в других ее областях. В связи с этим возникает очень важный вопрос о том, каким образом следует вести нагрев детали, чтобы вообще исключить такое прорастание дефекта или, по крайней мере, остановить его на стадии размера, не опасного для дальнейшей эксплуатации.

В качестве модели для исследования в работе выбран сплошной цилиндр радиуса r_c довольно большой длины (длина цилиндра значительно больше его поперечного размера) со свободными торцами и со свободной от нагрузок сосной дис-