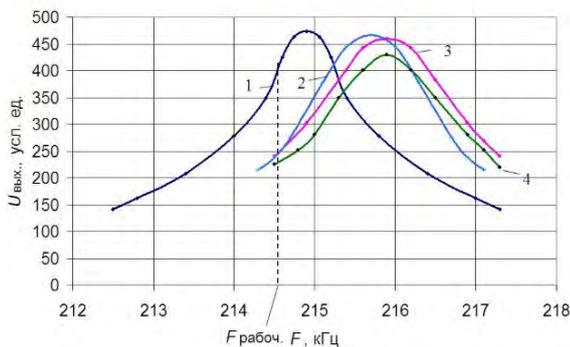


Как показали исследования, при выборе  $F_{\text{рабоч}}$  в пределах указанного выше интервала 50 кГц ÷ 200 кГц, при резонансном способе измерения достигается не только максимальная чувствительность  $U_{\text{вых}}$  к  $d$ , но и наблюдается существенное уменьшение влияния вариаций величин электромагнитных параметров материала напорной трубы на  $U_{\text{вых}}$ . Рассмотрим, за счет чего это происходит. На рисунке 5 приведены АЧХ ВТП, полученные как при отсутствии проводящих объектов в его чувствительной области (кривая 1), так и при наличии на расстоянии 60 мм от ВТП одной из следующих пластин – дюралевой, медной или стальной (из магнитной нержавеющей стали).



1 – при отсутствии возле ВТП проводящих объектов;  
2 – при наличии возле ВТП дюралевой пластины,  $d=60$  мм;  
3 – при наличии возле ВТП медной пластины,  $d=60$  мм;  
4 – при наличии возле ВТП стальной магнитной пластины,  $d=60$  мм

Рисунок 5 – АЧХ ВТП

Из рисунка 5 видно, что в области  $F_{\text{рабоч}}$ , величины  $U_{\text{вых}}$ , измеренные при наличии одной из трех пластин, близки между собой по величине.

Это объясняется тем, что при приближении немагнитной пластины к ВТП уменьшается индуктивность его обмотки возбуждения (под действием вторичного поля вихревых токов пластины), чем выше электропроводность пластины, тем это уменьшение сильнее. В результате резонансная частота обмотки возбуждения ВТП возрастет. Однако, чем больше электропроводность пластины, тем больше в ней потери на вихревые токи и тем сильнее уменьшается добротность резонансного контура. Это приводит к уширению резонансной кривой. В результате при некоторой фиксированной рабочей частоте, меньшей самой низкой из всех трех рассматриваемых резонансных частот, величины  $U_{\text{вых}}$  для материалов с различной электропроводностью оказываются близкими или равными. При поднесении к ВТП проводящей магнитной пластины к указанным выше явлениям дополняется еще одно – существенно возрастают активные потери в контуре, что также приводит к уменьшению добротности резонансного контура [2]. В результате, как видно из рисунка 5, и для магнитной пластины при  $F_{\text{рабоч}}$ , величина  $U_{\text{вых}}$  оказывается близкой к тем значениям, которые были при поднесении дюралевой и медной пластин.

Установки для контроля соосности гибких гофрированных трубопроводов применяются на Могилевском заводе полимерных труб.

1. Дорофеев А.Л. Индукционная структуроскопия. – М.: Энергия, 1973. – 171 с.
2. Дорофеев А.Л., Казамапов Ю.Г. Электромагнитная дефектоскопия. – М.: Машиностроение – 1980. – 232 с.

УДК 53.088.6

## КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОРИЕНТАЦИИ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

Шведов А.П.

Тульский государственный университет  
Тула, Российская Федерация

Система ориентации и навигации является одной из основных частей системы управления подвижного объекта.

Особый интерес представляют малогабаритные системы ориентации, построенные на базе микросистемных чувствительных элементов, благодаря широкому кругу задач, которые решаются или в перспективе могут разрешиться за счет применения данных систем.

Этот факт обусловил широкое распространение таких микросистемных чувствительных элементов как микромеханические датчики угловой

скорости (ДУС), микромеханические акселерометры, микросистемные магниторезистивные датчики магнитного поля, пирометрические и другие типы датчиков, на базе которых стоят современные бесплатформенные системы ориентации.

Отличительная особенность систем, построенных на базе микросистемных датчиков заключается в том, что основным ядром этих систем, являются специальные алгоритмы обработки информации и схемотехнические решения, направленные на повышения достоверности

информации, поступающей с первичных измерителей.

В частности, можно выделить группы алгоритмов, направленные на повышение точности в условиях изменяющейся в широких пределах температуры (схемы температурной стабилизации и алгоритмы температурной компенсации), алгоритмы компенсации перекрестной чувствительности и т.п.

Следует отметить, что указанные группы алгоритмов направлены, прежде всего, на уменьшения погрешности в выходном сигнале датчиков, но не позволят достигнуть качественно новых точностных характеристик, например, устранение накапливаемой погрешности в системе, построенной на базе ДУС, или обеспечение требуемого уровня точности в условиях сильных магнитных полей в магнитометрической системе. Таким образом, применения указанных алгоритмов и схемотехнических решений оказывается недостаточным.

Качественно нового уровня в таких системах удается достичь за счет применения микросистемных измерителей, работающих на разных физических принципах и комплексной (совместной) обработки информации, формируемой этими измерителями.

Технический результат, который удается достичь за счет комплексной обработки информации во многом определяется параметрами связующего звена, которое, собственно, реализует алгоритмы комплексной обработки информации.

Ввиду того, что информацию, поступающую с датчиков, при решении задачи ориентации можно интерпретировать по-разному. Например, информацию, формируемую ДУС, можно использовать введения ограничений на параметры углового движения и динамические напрямую для определения текущей угловой скорости или характеризовать текущее угловое положение объекта, применив один из известных алгоритмов интегрирования (на базе кватернионов, на базе углов Эйлера-Крылова, параметров Кэли-Клейна и т.п.) [1], или, в конце концов, учтя текущую угловую скорость, спрогнозировать угловую ориентацию подвижного объекта в последующие моменты времени. С другой стороны, информацию, поступающую с акселерометров, путем соответствующей обработки, использовать как для определения углового положения, так и судить о текущем ускорении объекта или его перемещении [1]. В связи с этим на сегодняшний день существует большое количество способов и типовых схем построения алгоритмов комплексирования.

В настоящее время широкое распространение получили алгоритмы комплексирования на базе фильтров Калмана (ФК), что объясняется их относительной простотой, эффективностью и возможностью адаптации по ту или иную задачу (модификации ФК [2]). При этом эффективность применения ФК в большой степени зависит от точности прогнозирования оцениваемого параметра, что обусловило формирование схем комплексирования, использующих дополнительную априорную информацию либо о параметрах движения объекта, либо о его динамической модели. [2] Этот факт существенно ограничивает область применения указанных алгоритмов. Отказ от этой информации и расширение области применения алгоритмов привел к появлению, схем комплексирования, инвариантных (не чувствительных) к текущим параметрам движения объекта (рисунок 1) [2], недостатком которых является, то что они не позволят проводить оценку систематических погрешностей датчиков и снижают только уровень шума на выходе системы [1].

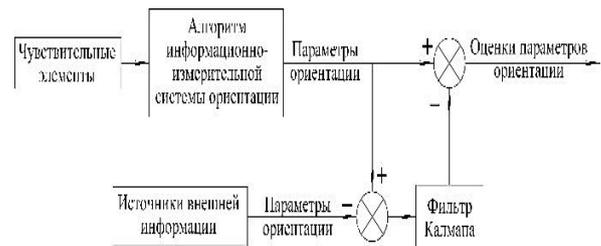


Рисунок 1 – Инвариантная схема комплексирования на базе фильтра Калмана

В связи с вышесказанным интерес представляет разработка схем комплексирования, учитывающих динамику движения объекта, но не использующих информацию о динамической модели или параметрах движения объекта. Решить данную задачу удастся за счет того, что информацию с ДУС, как отмечалось выше, можно использовать для прогнозирования угловой ориентации объекта, тем самым избавляясь от необходимости свойства объекта. На рисунке 2 приведена схема, демонстрирующая общий подход к построению связующих звеньев, базирующихся на указанном принципе.

Согласно схеме, информация с ДУС используется для формирования матрицы прогноза, то есть для определения ожидаемых значений оцениваемых параметров. Для формирования вектора измерения привлекается информация, поступающая с датчиков, которые позволяют характеризовать текущую угловую ориентацию объекта. При этом допускается, что в сиг-

нале датчиков может присутствовать систематическая составляющая или постоянная, либо зависящая от угловой ориентации объекта.



Рисунок 2 – Схема формирования связующего звена на базе фильтра Калмана

Согласно схеме, информация с ДУС используется для формирования матрицы прогноза, то есть для определения ожидаемых значений оцениваемых параметров. Для формирования вектора измерения привлекается информация, поступающая с датчиков, которые позволяют характеризовать текущую угловую ориентацию объекта. При этом допускается, что в сигнале датчиков может присутствовать систематическая составляющая или постоянная, либо зависящая от угловой ориентации объекта.

Примером таких датчиков могут служить акселерометры, формирующие кажущееся ускорение, которое содержит информацию как о векторе ускорения силы тяжести Земли, так и о текущем ускорении объекта, датчики магнитного поля, в выходном сигнале которых содержатся проекции напряженности магнитного поля Земли, на основании которых может быть определена текущая угловая ориентация объекта, а также составляющие обусловленные действием магнитотвердых и магнит мягких материалов самого объекта [3] и т.п.

В свою очередь, вектор оцениваемых параметров включает в себя как параметры, необходимые для решения задачи ориентации, так и параметры описывающие систематические погрешности датчиков, которые необходимы для разделения полезных и вредных составляющих в выходном сигнале компенсируемых датчиков.

Общий принцип работы связующих звеньев, построенных по данной схеме заключается в том, что составляющие сигналов компенсируемых датчиков, определяющих текущую угловую ориентацию объекта, в отличие от систематических погрешностей коррелируются с сигналами, формируемыми ДУС, и могут быть легко разделены. В результате этого достигается повышение

точности определения параметров ориентации объекта, которые в последствии рассчитываются по оценке параметров ориентации, формируемых ФК.

Эффективность данного подхода подтверждается на схеме комплексирования в составе курсовретикали, объединяющей ДУС, акселерометры и датчики магнитного поля (рисунок 3), которая нашла применение в контуре управления малогабаритного летательного аппарата.

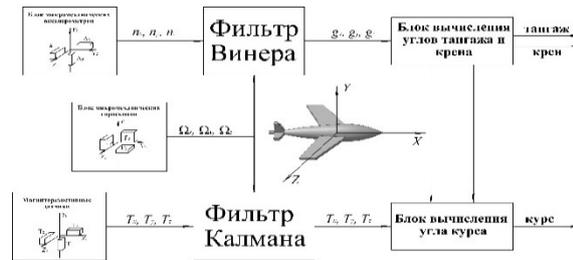


Рисунок 3 – Схема курсовретикали на базе ДУС, акселерометров и датчиков магнитного поля

В данной схеме фильтр Калмана обеспечивает компенсацию погрешностей датчиков магнитного поля, обусловленную наличием магнитотвердых материалов объекта, а фильтр Винера является одной из модификаций фильтра Калмана [2] и обеспечивает формирование оценок проекции вектора силы тяжести Земли на оси связанной с летательным аппаратом системы координат.

Таким образом, предложенный подход позволяет обеспечить снижение систематических погрешностей системы ориентации без дополнительных ограничений на динамику полета и т.п.

1. Шведов А.П. Способы повышения точности информационно-измерительных систем ориентации подвижных объектов: Диссертация на соиск. уч. степ. канд. техн. Наук: 05.11.16. ТулГО университет». – Тула: Изд. ТулГУ. – 2010. – 171 с.
2. Степанов О. А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 496 с.
3. Шведов А.П., Погорелов М.Г., Малютин Д.М. Системы ориентации магнитометрического типа для подвижных объектов / Справочник. Инженерный журнал. Приложение. – № 6. – 2010. – С.10-14.