

Спутниковые микроакселерометры и задачи, решаемые с их помощью

Боев И. А.

Студент

кафедра «Системы автоматического управления»

Научные руководители: Буцев А.А., доцент кафедры «Элементы приборных устройств»;

Дубовской В. Б., к.ф.-м.н., заведующий лабораторией института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН;

Леонтьев В. И., к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Bdfy9@yandex.ru

Космические системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются одними из самых востребованных научных разработок в различных областях. Кроме их широкого применения в оборонной отрасли, приведу пример из области народного хозяйства. Федеральное агентство лесного хозяйства заинтересовано в практически непрерывной съемке лесов России спутниками ДЗЗ.

При растущих требованиях к спутниковым системам наблюдения становится необходимо усовершенствование космических аппаратов (КА) и различных бортовых систем. Это в первую очередь затрагивает высокоточные измерительные системы орбитального и углового движения.

Безусловно, для управления КА часть информации поступает из наземных комплексов управления. Но программы обеспечивающих систем (навигации, ориентации, стабилизации) для функционирования целевой аппаратуры будут рассчитываться на борту КА. При этом повышается уровень автономности и интеллектуализации работы бортовой системы управления КА.

Одной из ключевых задач является определение параметров и характера движения центра масс на его борту. Такого рода навигацией занимается аппаратура потребителей ГЛОНАСС и GPS. Но и их не будет достаточно использовать на борту КА, поэтому требуется система определяющая движение КА, адекватная реальным возмущениям.

Возмущающие ускорения, действующие на центр масс КА на орбитах в диапазоне от 300 до 700 км составляют от 10^{-5} до 10^{-8} м / с². Чтобы добиться требуемой точности не более 1% от измеряемой величины необходимо на борту КА установить высокочувствительные приборы, измеряющие кажущееся ускорение, называемые *акселерометрами*. Их порог чувствительности в данном случае должен быть не хуже чем от 10^{-7} до 10^{-9} м / с².

Прежде чем конкретно говорить о спутниковых микроакселерометрах, расскажу о классификации, принципе действия и параметрах акселерометров.

Основной подход, по которому ведется их классификация, является принцип действия. Существует две группы акселерометров: маятниковые и емкостные. Далее будут рассмотрены эти группы с их представителями и примерами.

Емкостные акселерометры получили свое название из-за того, что принцип их действия основан на изменении электрической емкости между статическим и динамическим состояниями. Соответственно в конструкцию таких приборов обязательно должен входить конденсатор (эти датчики еще называют акселерометрами на переменных конденсаторах).

Принцип действия любого акселерометра основан на втором законе Ньютона: $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m\vec{a}$. В состав каждого прибора входит некий элемент, называемый инерционной массой (ИМ). Эта ИМ прикреплена к одной из двух пластин конденсатора, совершающей перемещение внутри корпуса, а вторая пластина статична и, как правило, соединена с корпусом. ИМ отстает от движения корпуса: это достигается воздействием силы со стороны другого конструктивного элемента - пружины, при изменении скорости корпуса. Соответственно эта сила изменяет движение ИМ, следовательно, пружина изгибается, а расстояние между корпусом и ИМ изменяется. В емкостных акселерометрах корпус и ИМ изолированы друг от друга и их электрическая емкость измеряется. Как известно из формулы электрической емкости плоского конденсатора: $C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d}$, при уменьшении расстояния между обкладками (d), емкость (C) увеличивается, и электрический ток идет по направлению к сенсору. Если же расстояние увеличивается, то сенсор преобразует ускорение тела в электрический ток, заряд или напряжение. Из этого следует вывод, что расстояние между телом и ИМ изменяется пропорционально ускорению тела.

Следует отметить, что для измерения микроскопических амплитуд вибрационных колебаний или линейных ускорений требуется высокоточный детектор таких перемещений. Максимальное перемещение, определяемое емкостными акселерометрами, составляет около 20 мкм. Это условие сильно влияет на область применения таких акселерометров.

Существует два основных подхода решения проблемы определения малых перемещений: конструктивный и технологический.

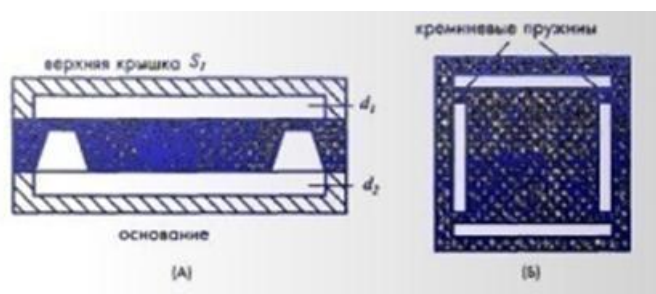


Рис. 1. Емкостной акселерометр с дифференциальным конденсатором:

А — поперечное сечение акселерометра, Б — вид сверху.

Наиболее сложную конструкцию имеют емкостные акселерометры с дифференциальным конденсатором. В состав таких датчиков вводят дополнительный конденсатор, емкость которого близка по значению к емкости основного конденсатора. При добавлении еще одного конденсатора нужно учитывать сдвиг фаз напряжений. Если сдвиг фаз равен $180^\circ (\pi)$, то величина ускорения акселерометра будет пропорционально разности значений емкостей двух конденсаторов.

На рис. 1.А. изображено поперечное сечение такого акселерометра. Здесь ИМ расположена между верхней крышкой и основанием.

На рис. 1.Б. показано, что ИМ поддерживается четырьмя кремниевыми пружинами.

На выходной сигнал также будут влиять температура и рассогласование значений конденсаторов. Повысить точность датчика можно с помощью системы самокалибровки, так как на акселерометр влияют различные электростатические силы.

Наиболее технологичными являются акселерометры, основанные на микроэлектромеханических системах (МЭМС). В таких датчиках чувствительный элемент (ЧЭ) сделан из монокристаллического кремния и стекла, что дает высокие надежность, точность и устойчивость по отношению к воздействию времени и температуры.

Если ЧЭ такого акселерометра имеет диапазон измерений $\pm 1g$, то датчик выдерживает перегрузки около 50000g. В то же время он чувствителен к статическому ускорению и вибрации.

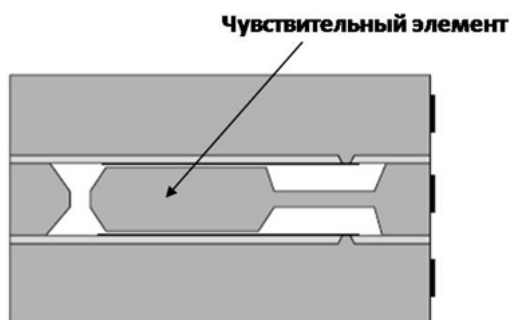


Рис. 2. ЧЭ емкостного МЭМС акселерометра

ЧЭ изготавливается технологией объемной микромеханики. На рис. 2. показан симметричный ЧЭ, между двумя конденсаторами. Симметрия уменьшает зависимость от температуры и улучшает линейность. При изготовлении акселерометра были использованы «3D-МЭМС» технология и «ЧИП-на-МЭМС» интеграция.

Исходя из свойств емкостных акселерометров, их используют для измерения низкочастотной вибрации, движения и фиксированного ускорения.

Область применения таких датчиков очень обширна, и вот только некоторые из них: системы управления летательными аппаратами, безопасность движения автомобилей, сельскохозяйственная техника.

В качестве примера приведу марки емкостных акселерометров: LIS302DL, LIS331AL.

Маятниковые акселерометры принципиально отличаются от выше рассмотренных. Основной конструктивной составляющей является маятник, смещение которого с точки равновесия должен регистрировать прибор.

В каждом маятниковом акселерометре есть упругий подвес (УП), при воздействии ускорения на который по оси чувствительности, происходит компенсация момента силы. Так как маятник прибора и УП соприкасаются друг с другом, подвес приводит в движение маятник. В конструкцию прибора также должен входить элемент, возвращающий маятник в исходное состояние, например, катушка обратной индуктивности. То есть, при воздействии ускорения на УП маятник отклоняется на определенную амплитуду в определенную сторону, по чему можно судить о величине ускорения и его направлении.

При относительно простой конструкции точность измерений во многом зависит от конструкции и технологических свойств УП. В основном в качестве УП используются торсионы. Торсионы есть пружины в виде вала, работающего на кручение. Толщина торсионов не превышает 50 мкм, а их материал (как правило, высокотехнологичный сплав или монокристалл) должен обладать необходимыми механическими свойствами (высоким относительным удлинением, прочностью).

Рассмотрим некоторые из маятниковых акселерометров различной конструкции и принципа действия.

В микромеханических акселерометрах (ММА) подвесами являются торсионы, изготовленные из монокристаллического кремния марки КЭФ-4,5 (100). Создатели таких датчиков обратили внимание на сечения торсионов и рассмотрели три случая: крестообразное, круглое и прямоугольное сечения. В результате моделирования максимальное напряжение в торсионе при повороте на угол 34,4 угл. мин. было у

крестообразного торсиона ($4,86 \cdot 10^6$ Па). Следовательно, именно такой торсион является наиболее технологичным.

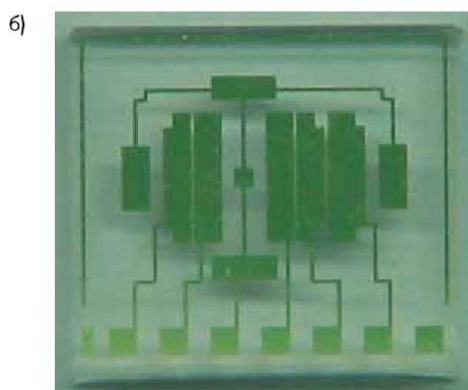
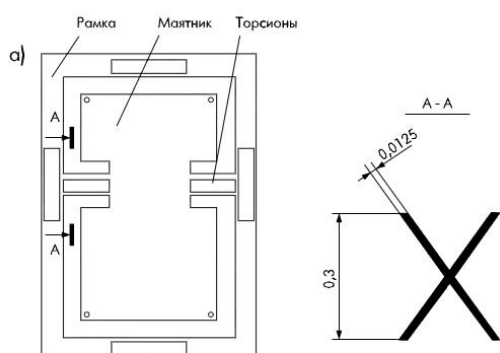


Рис. 3. Конструкция чувствительного элемента акселерометра с крестообразным сечением торсионов (а), фотография платы (б)

Конструкция ММА представлена на рис. 3.А. ММА состоит из маятника, УП в виде крестообразных торсионов и рамки. На рис. 3.Б. показана фотография платы датчика.

При действии линейного ускорения величиной $2g$ обеспечивается касание упоров, ММА выдерживает удар величиной до $125g$.

Для наилучшей герметизации (снижения трений и увеличения чувствительности) возможно применение газопоглотителей.

Существование гибридных МЭМС акселерометров стало возможно при совместном использовании МЭМС технологии и электромеханических элементов. В частности в МГТУ им. Н. Э. Баумана имеется большой опыт в создании гибридных МЭМС приборов.

Рассмотрим один из вариантов конструкции акселерометра типа «Si-flex». Подвесом здесь является конструкция из 4 перемычек. При любой ориентации перегрузки две из четырех упругих перемычек испытывают усилия растяжения и не дают возможности потери устойчивости у перемычек, испытывающих усилие сжатия. Это позволяет датчику испытывать большие ударные перегрузки. Также в конструкцию этого акселерометра входит кремниевый маятник, емкостные датчики положения и

газовый демпфер.

Диапазон измерения таких акселерометров около $\pm 5g$, чувствительность $10^{-5}g$, полоса пропускания около 200 Гц и уход нуля около 300 мкг.

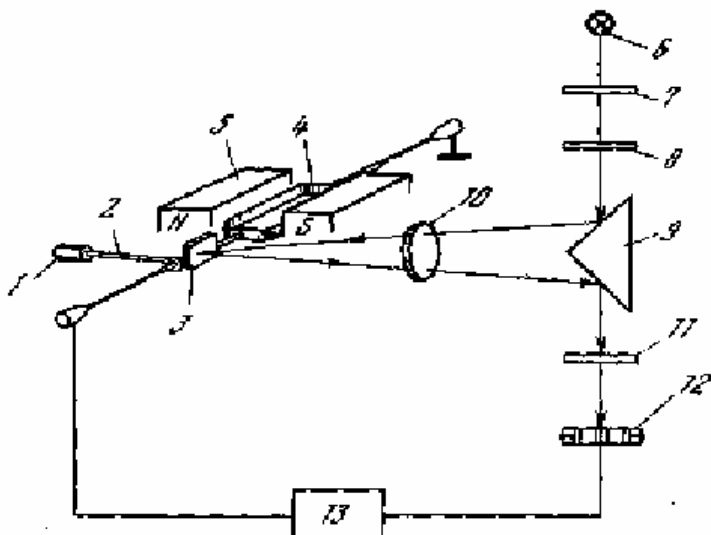


Рис. 4. Схема прецизионного датчика гравиинерциальных ускорений ИМУ-1

Одни из самых высокочувствительных акселерометров являются датчики измерителей микроускорений (ИМУ). Они были разработаны в институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН. В качестве УП используются торсионы толщиной около 10 мкм, сделанные из высокотехнологичного сплава. На рис. 4. изображена конструкция ИМУ-1. Катушка обратной связи 4 с помощью торсионных растяжек расположена в зазоре магнитной системы 5. Зеркало 3 и пробная масса 1 крутильного маятника

жёстко связаны с катушкой обратной связи. Излучение от источника света 6 проходит через конденсор 7, диафрагму 8, призму 9, объектив 10 и через призму 9 и маску 11 свет попадает на дифференциальный фотоприемник 12.

Повышена чувствительность и стабильность нуля датчика за счет уменьшения механической связи пробной массы с корпусом прибора, температурные возмущения снижены за счет использования маломощного источника света с высоким КПД, датчик имеет высокую линейность и большой динамический диапазон за счет жесткой отрицательной обратной связи, влияние магнитного поля Земли минимизировано применением супермалоевого экрана. Чувствительность такого акселерометра на уровне 10^{-9} g .

Высокоточные маятниковые акселерометры применяются в КА, авиации, строительстве и т. д. Определяющим фактором является большая чувствительность таких приборов.

В качестве примера приведу марку акселерометра ИМУ-128, измерявший микроускорения на борту МКС.

Последнее время появились разработки, совмещающие в себе и маятниковый, и емкостной акселерометры.

Для спутниковых микроакселерометров необходимым критерием является чувствительность около 10^{-7} до 10^{-9} м / с^2 . К акселерометрам такого класса в России относятся в основном только ИМУ. За рубежом известны высокочувствительные приборы такие, как «Кактус» (Франция), «Дискос» (США).

Также важными критериями являются уход нуля, диапазон измерений, частотный диапазон. Температурный диапазон, ударная нагрузка, число осей, скорость выборки, размер и масса. К примеру, при выходе на орбиту КА испытывает большие перегрузки. Как правило, такие перегрузки выдерживают емкостные акселерометры с малой чувствительностью, то есть они работают на борту пока КА не выйдет на орбиту, а при выходе на орбиту включаются высокоточные маятниковые.

Однако определяющим фактором является наличие в конструкции акселерометра упругого подвеса (маятниковые акселерометры), что накладывает определенные условия на эксплуатацию и область применения.

Но и у емкостных акселерометров есть большой недостаток. Принцип действия акселерометра таков, что электростатические силы вносят изменения в его работу. Вследствие этого акселерометр практически невозможно испытать в земных условиях.

Российские конструкторы специфицированы в основном на маятниковых акселерометрах (МЭМС, ИМУ, ММА). Разработкой же емкостных и реже маятниковых занимаются страны Европы и США. Одним из наиболее часто используемых акселерометров для контроля полета космических аппаратов является акселерометр SAMS.

Итак, спутниковые микроакселерометры являются определяющими навигационными, стабилизационными и ориентировочными приборами для КА. Эти датчики имеют различные варианты конструкции, принципов действия и модернизации. А при повышении точности этих приборов все космические системы наблюдения станут более совершенными.

Литература

1. Дубовской В. Б., Кошелев А. В., Пшеняник В. Г. Разработка высокочувствительных акселерометров для бортовых систем навигации и управления космических аппаратов ДЗЗ нового поколения. Мат. 7 н.-т. к. М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2010, С. 209-304.
2. Дубовской В. Б., Пшеняник В. Г., Степанов Г. Н. О перспективах использования на борту космических аппаратов ДЗЗ нового поколения высокочувствительных акселерометров. 2009, С. 299-301.

3. Дубовской В.Б., Леонтьев В.И., Сбитнев А.В., Пшеняник В. Г. Акселерометры для обеспечения безопасности строительства. 2006.
4. Бойко А. Н., Симонов Б. М. Микромеханические акселерометры: моделирование элементов конструкции и изготовление. ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, технология, бизнес, 2009.
5. Коновалов С. Ф., Пономарев Ю. А., Майоров Д. В., Подчерцев В. П., Сидоров А. Г. Гибридные микроэлектромеханические гироскопы и акселерометры. Эл.н.-т. издание наука и образование. 2011, С. 1-8.