P 8

Линейные пьезоактуаторы с интегрированным тензометрическим датчиком для нанометрового высокостабильного позиционирования

T. Porchez, F. Barillot, C. Belly
Cedrat Technologies SA, Meylan, France

Аннотация:
Во многих областях применения требуются механизмы с возможностью настройки положения с нанометровым разрешением, а также с возможностью удерживать это положение в течение длительного периода времени (более нескольких дней). Для таких задач очень хорошо подходят пьезоактуаторы, так как они легко обеспечивают нанометровое разрешение. Тем не менее, они требуют применения датчика положения, чтобы иметь возможность поддерживать стабильное положение в течение длительного времени. До недавнего времени, долгосрочная стабильность тензорезисторов (SG), применяемых при измерении положения, была под вопросом. Используя ноу-хау в области интеграции тензорезисторов и новое оборудование, компании Cedrat Technologies удалось продемонстрировать способность пьезомеханизма с интегрированными тензодатчиками достигать нанометровую стабильность положения. Эта технология открывает новые возможности для промышленной, авиационной и космической техники.

Ключевые слова: Пьезо, Тензометрические Датчики, Нанометр, стабильность, Космический

Введение

В большинстве случаев, компактность и стоимость являются важными вопросами. Это еще более справедливо для космических применений. Пьезоэлектрические механизмы предлагают компактное решение, с высоким разрешением, большим сроком службы и высокой надежностью. Основным недостатком является то, что эти приводы являются нелинейными, такие как присутствует гистерезис и эффекта дрейфа (крип), что требует управления с обратной связью и датчиком положения. Cedrat Technologies обладает опытом работы с интегрирацией тензометрических датчиков положения (SG) для линеаризации положения своих пьезо-механизмов с целью получения высокой точности и стабильности. Технология SG имеет опыт применения в космосе, так как он уже была использована в миссии Rosetta [2] и выбрана для других космических программ [1]. Бесконтактные датчики, такие как емкостные или индукционные датчики положения хорошо известны как точные датчики, но их габариты и стоимость являются основными недостатками, особенно для многоосевых систем.

В этой статье описывается новый двухтактный механизм на основе PPA40M-SG, пригодный для работы в космосе (см. Рис.1), который называется NLA (Nanometric Linear Actuator). Этот актуатор оборудован тензометрическими датчиками, которые позволяют с высокой точностью детектировать положение и реализовывать управление с обратной связью. Были проведены испытания этого механизма для того чтобы продемонстрировать возможность достижения нанометровой точности и долговременной стабильности.

Пьезоэлектрический механизм со встроенными тензометрическими датчиками SG для космического применения

Механизм сделан на основе актуаторов PPA40M, установленных в двухтактную конфигурацию (Рис. 1). Двухтактная конфигурация состоит из двух актуаторов, которые движутся одновременно, но в противоположных направлениях, т.е. когда один актуатор тянет, то другой - толкает. Эти два актуатора встроены в механизм, кинематика которого использует преимущества такого противоположного движения. Эта механическая топология обеспечивает преимущество, позволяющее уменьшить некоторые паразитные эффекты и суммировать ход обоих актуаторов. Этот механизм был разработан для космического применения, в котором требуется высокая точность и долгосрочная стабильность. Разработка была выполнена в соответствии с требованиями ECSS. Избыточность обеспечивается за счет применения двух независимых пакетов керамики в каждом актуаторе, что обеспечивает первичный и вторичный контур приведения в действие. Другими словами, в механизме используется четыре пакета пьезо керамики для обеспечения избыточности. При активации обоих контуров общий ход механизма составляет около 80 мкм. Или один контур будет обеспечивать 40 мкм, а второй контур будет обеспечивать избыточность. Модель механизма была собрана и испытана на способность выдерживать воздействие условий окружающей среды ограничения (вибрация и удары), так как он предназначен для космических приложений.

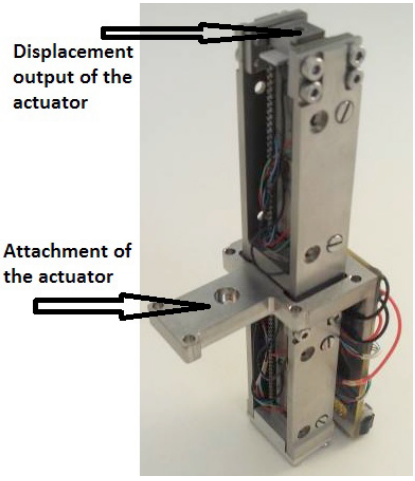

***Рис. 1**: Вид NLA.*

С точки зрения электроники, двухтактная конфигурация требует специальной электрической конфигурации для приведения в движение керамики. Керамика соединена последовательно таким образом, что на каждый канал имеются три электрических провода, как указано на Рис. 2.

Два электрических контакта обеспечивают постоянное регулируемое напряжение на сторонах пакета. Для создания движения в канале изменяется только напряжение в средней точке между двумя пакетами керамики. Благодаря этой конфигурации, подаваемое на пакеты керамики напряжение, естественным образом изменяется в противоположном направлении, создавая, как это и требуется, движение керамики в противоположных направлениях.

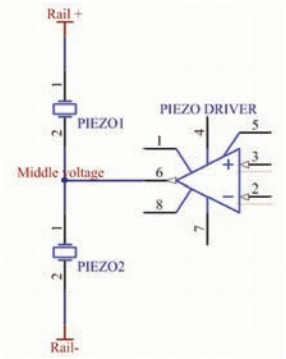

***Рис. 2**: Электрическая конфигурация для двухтактных механизмов.*

Механизм оснащен высокостабильными тензометрическими датчиками SG, которые позволяют использовать достоинства двухтактной механической конфигурации. SG приклеены на пьезокерамику, как показано на Рис. 3. На каждом пакете керамики имеется два SG. SG элементы установлены на всех пакетах керамики, чтобы контролировать перемещение всех активных элементов механизма. Таким образом, SG мост состоит из 8 элементов SG, вместо обычных 4-х.

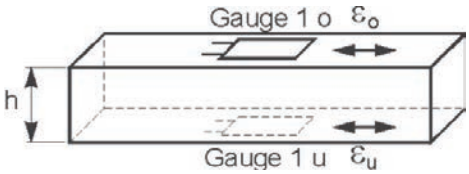

***Рис. 3**: SG монтаж на керамике.*

Для получения наилучшей производительности SG элементы соединены в конфигурацию полного моста Уитстона. Полная конфигурация моста (Рис. 4) была выбрана для повышения чувствительности при одновременном ограничении теплового воздействия и ошибок, связанных с нелинейностью.

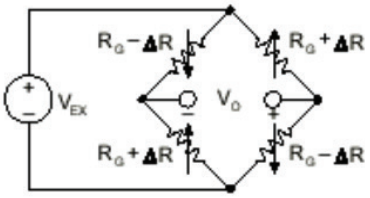

***Рис. 4**: Электрическая конфигурация моста.*

Для упрощения на Рис. 4 указаны только 4 SG элемента. Но теория остается такой же и для 8-и элементов. При 8-и элементной конфигурации, последовательно соединенные элементы SG установлены попарно, чтобы сформировать эквивалент единого SG элемента моста. Чувствительность SG в зависимости от деформации и температуры приведена в Формуле 1.

$$\frac{\Delta R}{R} = GF_x \times (\varepsilon_{strain} + \varepsilon_{thermal}) \qquad (1)$$

Выходное напряжение моста определяется по Формуле 2, где $R_{1,3} = R_0 - \Delta R$, $R_{2,4} = R_0 + \Delta R$

$$Vout = Возбуждение \times \left(\frac{R4}{R3+R4} - \frac{R2}{R2+R1}\right) \qquad (2)$$

Тепловое воздействие имеет один и тот же знак для всех SG; все они подвергаются тем же изменениям температуры. На основании Формулы 1 и Формулы 2, итоговое выходное напряжение моста может быть описано Формулой 3:

$$Vout = Возбуждение \times \frac{SG}{4} \times 4\varepsilon_{strain} \qquad (3)$$

Уравнение 3 показывает, что при полной конфигурации, мост теоретически нечувствителен к температурным воздействиям благодаря симметрии моста. Эта теория справедлива до тех пор, пока между компонентами моста не возникает никаких температурных градиентов. Степень компенсации зависит от равномерности температуры на уровне тензометрических датчиков. Температурная стабильность таких сенсоров была исследована более подробно в [1].

По сравнению с конкурирующими технологиями определения положения, такими как емкостные или импульсные датчики, основными преимуществами датчиков SG являются компактность и низкая стоимость. Датчики SG часто рассматривают как решение с низким уровнем производительности. На практике датчики SG обеспечивают прекрасную линейность, хорошую полосу пропускания и отношение сигнал-шум. Основным фактором неизвестности являлась долгосрочная стабильность этих датчиков в приложениях пьезо приводов. Этот аспект исследуется в ходе испытаний, чтобы показать, что при надлежащей интеграции и надлежащем использования, достигается долгосрочная нанометровая стабильность.

Макет этого актуатора представлен на Рис. 1. Эта макетная модель представляет космический уровень, за тем исключением, что сборка не производилась в чистой комнате. Тензорезисторы были интегрированы с использованием космических технологий компании Cedrat Technologies. Эта макетная модель предназначена для испытаний.

Испытательный стенд

Для выполнения высокоточных измерений на новом устройстве было разработано и настроено специализированное испытательное оборудование. Стенд представлен на Рис. 5.

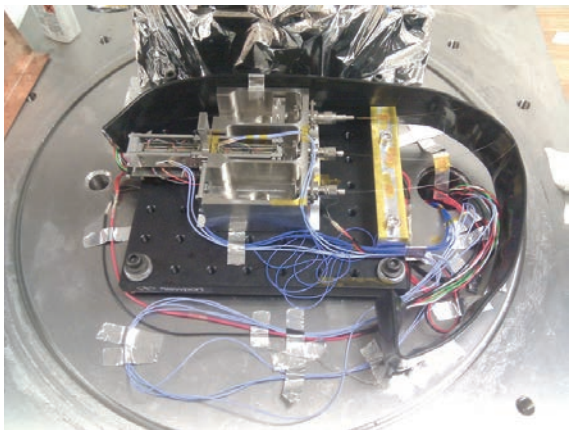

***Рис. 5**: Специализированный стенд.*

Установка сделана на основе высокоточного лазерного интерферометра, который используется в качестве абсолютного датчика положения. В нанометровом диапазоне нельзя пренебрегать чувствительностью лазера к изменению давления. Поэтому стенд встроен в общую вакуумную камеру для обеспечения достаточной стабильности давления. Температура стенда также контролируется, так как изменение температуры создает паразитные смещения из-за теплового расширения.

Параметры стенда были испытаны во время длительных измерений, выполняемых на механизме. На Рис. 6 указано давление (нижний синий график) и измерение температуры (верхний график) во время четырехнедельных испытаний. Давление стабилизируется на уровне около 20 мТорр через два дня после начала теста. По прошествии двух дней измеренные колебания давления составляют несколько мТорр, что лучше, чем ожидаемая стабильность. Это означает, что давление достаточно стабильно, чтобы считать, что его влияние на опорный датчик положения является незначительным.
Во время испытания, заданное значение температуры составляет 25 °C. На температурной диаграмме черный график (среднее значение 20 °C) соответствует температуре окружающей среды за пределами климатической камеры. Другие графики соответствуют температурам стенда и механизма в различных положениях. Установленное регулировкой значение температуры составляет 25 °C, но на практике средняя температура установки составляет 24 °C. Регулировка не является очень точной, но это не является проблемой, так как цель состоит в том, чтобы добиться высокой стабильности, а не высокой точности. Таким образом, температура окружающей среды изменяется в диапазоне ± 1 °C во время испытания. Благодаря регулировке температуры внутри камеры, внешние изменения в основном отклонены. Изменения температуры, наблюдаемые на стенде или пьезо-механизме не превышают ± 0,15 °C.

Полученная температурная стабильность достаточна для проводимых испытаний, но изменение температуры все еще влияет на измерение положения и вносит изменения в несколько нанометров. Это обозначает, что в дальнейшем температурная стабильность может быть улучшена, чтобы повысить производительность установки.

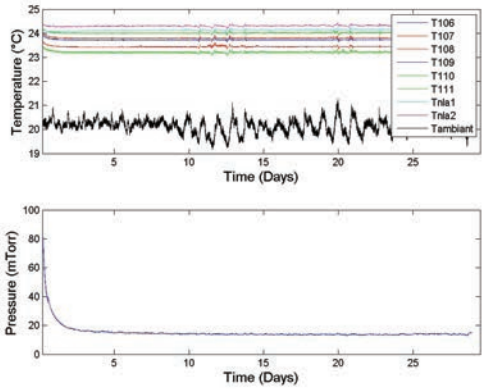

***Рис. 6**: Стабильность температуры и давления в камере во время испытаний.*

Результаты

Во время испытаний управление по положению пьезо-механизмом в закрытой петле осуществляется на основе обратной связи от встроенного датчика SG. Цель состоит в том, чтобы проверить, имеет ли механизм возможность реализовать стабильное движение в нанометровом диапазоне.

Чтобы продемонстрировать нанометровую точность пьезо механизма был проведен ряд испытаний. В частности, было проведено испытание с целью оценки долгосрочной стабильности позиции NLA. Для этого теста, система имеет фиксированную команду, и проверяется, что фактическое положение механизма остается стабильным в течение двух недель. Результат теста показан на Рис. 7:

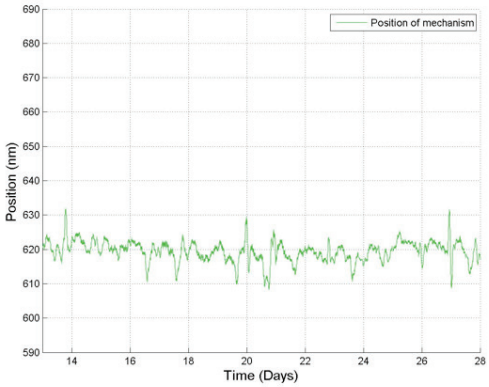

***Рис. 7**: Стабильность положения в течение 2-х недель.*

Результаты показывают, что механизм имеет возможность удерживать собственное стабильное положение в нанометровом диапазоне.

Среднее изменение положения остается в пределах менее ± 5 нм от исходного положения. «Быстрые» изменения в измерениях обусловлены изменениями температуры за пределами вакуумной камеры, которые не полностью компенсируются контролем температуры.

На Рис. 7 не представлены результаты первой недели испытания стабильности, а представлены только показатели стабильности после установки системы в соответствующее состояние. В течение первой недели тестирования стабильности, наблюдается остаточный дрейф на уровне примерно 40 нм, прежде чем система полностью установится. Этот эффект показан на Рис. 8.

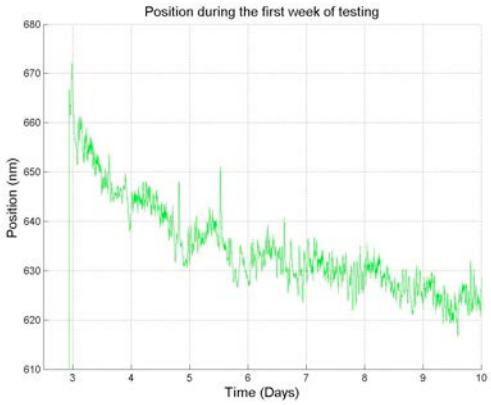

***Рис. 8**: Положение в течение первой недели тестирования.*

Этот результат означает, что существует остаточный дрейф механизма, который не определяется SG мостом. На Рис. 9 представлено изменение выхода контроллера в течение первой недели испытания. Выход контроллера не является постоянным, что компенсирует механический дрейф на уровне 620 нм.

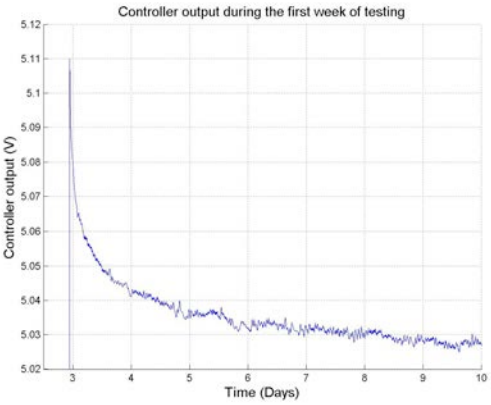

***Рис. 9**: Выход контроллера в течение первой недели тестирования.*

Ожидаемый механический дрейф соответствует дрейфу керамики. Этот дрейф предполагалась полностью измерить с помощью датчиков SG, но результаты показывают, что он компенсируется только до 94%. Таким образом, 6% из дрейфа керамики остаются некомпенсированными в замкнутом контуре и влияют на положение системы. Эта частичная нечувствительность к дрейфу образуется из-за разности коэффициента усиления между SG элементами моста.

Между SG элементами, входящими в состав моста, наблюдается разброс усиления 5-10%. Это обозначает, что их чувствительность к дрейфу также различна, что объясняет почему часть дрейфа не считывается с помощью датчиков, и, таким образом, не компенсируется в замкнутом контуре. Этот эффект может быть исправлен путем оптимизации повторяемости коэффициента усиления SG до и во время установки. Может быть предложено альтернативное решение, обеспечивающее подбор усиления SG после установки на керамике, перед установкой в механизм

Заключение

Новый пьезо-механизм для космического применения был разработан и испытан, особенно в части аспектов обеспечения долгосрочной стабильности. В механизме используются высококачественные элементы SG для обеспечения точного управления в замкнутом контуре. Результаты показывают, что механизм, как и ожидалось, обеспечивает нанометровое разрешение и долгосрочную стабильность.

Результаты испытаний также показывают, что прототип демонстрирует некоторый остаточный дрейф на уровне 40 нм в течение первой недели испытания на стабильность. Природа происхождения этого остаточного дрейфа определена, и он соответствует некомпенсированному вторичному эффекту, не ожидаемому ранее. Этот оставшийся дрейф может быть уменьшен за счет оптимизации топологии SG и интеграции.

Более общий вывод состоит в том, что датчики SG являются очень простыми и легкими в использовании для выполнения грубых измерений. Но для того, чтобы получить преимущества от высокой точности и высокой стабильности требуются знания в технологии применения тензометрических датчиков.

Благодарность

Эта работа финансировалась французским космическим агентством (CNES).

Список литературы

[1] Bourgain, F. & Sosnicki, O. (2013) Beam Steering Mechanism for Earthcare Atmospheric Lidar instrument – An improved piezoelectric Tip-Tilt mechanism, ESMAT2013

[2] Le Letty, R. et al. (2001) Rosetta The scanning mechanism for Rosetta / Midas – From an engineering model to the flight model, ESMATS2001

Контактные данные:

ООО "Промышленная метрология"
http://metrology-spb.ru/
тел. +7 (812) 438-17-18 (доб. 115)
факс +7 (812) 438-17-21
моб: +7 (950) 023-73-89
e-mail: karev_p@metrology-spb.ru