

Использование пьезодатчиков для определения места удара высокоскоростных частиц о поверхность космического аппарата

Д.Н. Новомейский, А.М. Телегин, Н.Д. Сёмкин

Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королёва
443086, Российская Федерация, г. Самара
Московское шоссе, 34

Рассмотрен вопрос регистрации частиц с помощью пьезодатчиков, принцип действия пьезодатчиков, их классификация и уравнение пьезоэффекта. Кроме того, приведена методика определения координат места удара высокоскоростных частиц о корпус космического аппарата.

Ключевые слова: классификация, пьезодатчики, пьезоэлектрический эффект, матрица, координаты места удара частицы.

Введение

Возрастающая активность в космическом пространстве многих стран приводит к его загрязнению фрагментами ракетно-космической техники и появлению нового класса техногенных пылевых частиц.

По результатам многочисленных исследований на высотах от 300 до 1600 км наблюдается наиболее высокая их концентрация. Поэтому исследование твердой составляющей межпланетной среды и ее взаимодействия с атмосферой Земли, различными телами солнечной системы и солнечным излучением имеет большое значение при решении различных задач. Регистрация ударов метеорных тел с помощью датчиков, установленных на космических аппаратах, позволяет изучать плотность потока очень мелких частиц [1]. Для этой цели можно использовать пьезодатчики.

1. Обзор принципа действия пьезоэлектрических датчиков

Работа пьезоэлектрического датчика основана на пьезоэлектрическом эффекте. Сущность его заключается в том, что на гранях некоторых кристаллов при их сжатии или растяжении появляются заряды, подобные поляризации. В качестве материалов для датчиков применяются кварц, титанат бария, сегнетова соль, турмалин и др. Пьезоэлектрические датчики от-

носятся к датчикам генераторного типа (входная величина – сила, выходная – количество электричества).

Различают прямой и обратный пьезоэлектрический эффект. Прямой пьезоэлектрический эффект состоит в том, что под влиянием механических напряжений на гранях некоторых кристаллов появляются электрические заряды. При снятии усилий кристалл возвращается в ненаэлектризованное состояние. Обратный пьезоэлектрический эффект заключается в том, что при внесении пьезокристалла в электрическое поле, силовые линии которого совпадают с направлением пьезоэлектрической оси, происходит изменение геометрических размеров кристалла (сжатие или растяжение) [2].

Прямой пьезоэлектрический эффект используется для измерений быстропротекающих динамических процессов (так как пьезоэлектрические датчики обладают высокой собственной частотой), например давления в стволах различных орудий при выстреле, давления газов в двигателях внутреннего сгорания, давления звуковых колебаний. Большое применение получили пьезоэлектрические адаптеры (звукосниматели), манометры, вибраторы для измерения вибраций машин, измерители ускорений (акселерометры) и многие другие устройства.

Обратный пьезоэлектрический эффект нашел применение, например, в ультразвуковых генераторах, с помощью которых можно произвести

очистку поверхности изделий из металла, стекла и керамики и т. п.

Следует отметить, что выходная мощность пьезодатчика очень мала, поэтому на его выходе должен быть включен электронный усилитель с большим входным сопротивлением. Усилитель и датчик соединены экранированным кабелем.

Пьезоэлектрические датчики обладают следующими достоинствами:

- малыми габаритами;
- простотой конструкции;
- надежностью в работе;
- возможностью измерения быстропеременных нагрузок [2].

Рассмотрим пьезоэффект в ударносжатых материалах. Метод основан на явлении пьезоэлектрического эффекта при прохождении ударных волн через пьезоэлектрик [3].

Уравнение, описывающее пьезоэффект, запишется в следующем виде:

$$\frac{\partial D(x, t)}{\partial t} = \frac{I(t)}{S}, \quad (1)$$

где S – площадь пьезодатчика; I – ток пьезодатчика; D – электрическая индукция.

Поляризация диэлектрика вызывается воздействием ударной волны. Уравнение поляризации:

$$D = \varepsilon \varepsilon_0 E + \tilde{e}P, \quad (2)$$

где E – напряженность электрического поля; \tilde{e} – пьезоэлектрический модуль; P – давление.

Учитывая, что

$$I(t) = C \frac{du}{dt} \quad \text{и} \quad \int_0^h EdV = -u,$$

после интегрирования (1) по толщине пьезодиэлектрика получим уравнение (3):

$$(C + C_0) \frac{du}{dt} + \frac{u}{R} = -S\tilde{e} \int_0^h \frac{\partial P(x, t)}{\partial t} dx. \quad (3)$$

Закон распространения ударной волны примет следующий вид:

$$P(x, t) = P_0 \left(\frac{R_0}{Ct} \right)^3 \left(\frac{x}{Ct} \right). \quad (4)$$

где P_0 – начальное давление на фронте ударной волны; c – скорость распространения ударной волны; t – текущее время.

Так как сигнальная часть зависит только от одного параметра, то метод, основанный на пьезоэффекте, является неполным. Данный метод может быть использован при совмещении с другими. Метод регистрации нуждается в тщательной защите от различного рода внешних воздействий (вибраций, ударов, термических шумов).

Применение пленочных сегнетоэлектриков, электретов в ударных экспериментах в информационном отношении идентичны пьезоэлементам. Выходной сигнал также зависит от произведения mW^α частицы (m – масса частицы, W – скорость, $1 < \alpha < 2$) [3].

2. Классификация пьезорезонансных датчиков

Классификация пьезодатчиков проводится по признакам, перечисленным в таблице [4].

Таблица
Классификация пьезодатчиков

| Классификационный признак | Виды пьезодатчиков |
|------------------------------|---|
| По применяемому материалу | Монокристаллические (кварц, ниобат лития и др.); поликристаллические (пьезокерамика). |
| По виду колебаний | По линейному размеру; радиальные; изгибные; крутильные; сдвиговые; на поверхностных акустических волнах; комбинированные. |
| По виду физических эффектов | Термочувствительные; тензочувствительные; акусточувствительные; гирочувствительные; контактные (использующие контактную жесткость и фактическую площадь контакта) и т. п.; доменно-диссипативные и др. |
| По количеству пьезоэлементов | Моноэлементные; биморфные (симметричные, асимметричные); триморфные и т. д. |
| По назначению | Для измерения статических и динамических давлений и усилий; для измерения линейных ускорений и угловых скоростей; для измерения параметров вибраций; для измерения параметров удара; для измерения звукового давления; для измерения влажности; для измерения вязкости; для гидроакустики; в ультразвуковой технологии; в электроакустике; в устройствах автоматики; в электронной технике и радиотехнике; в медицине и т. д. |

3. Методика определения координат места удара высокоскоростных частиц о корпус космического аппарата

Известна методика, приведенная в [5], предназначенная для определения координат места удара частиц космического мусора, метеоритов и других высокоскоростных частиц о корпус космического аппарата, которая основана на работе системы из четырех пьезодатчиков. Пьезодатчики размещаются на равных расстояниях друг от друга в декартовой системе координат, причем пьезодатчик P_3 помещается в начало координат. Место удара обозначается буквой S и имеет произвольные координаты x и y (рис. 1). Расстояния от места удара частицы до пьезодатчиков показаны на рис. 2.

Расстояния D_1 , D_2 , D_3 и D_4 определяются по формулам (5), (6), (7) и (8):

$$D_1 = \|S - P_1\| = \sqrt{(x-1)^2 + (y-1)^2}; \quad (5)$$

$$D_2 = \|S - P_2\| = \sqrt{(x-0)^2 + (y-1)^2}; \quad (6)$$

$$D_3 = \|S - P_3\| = \sqrt{(x-0)^2 + (y-0)^2}; \quad (7)$$

$$D_4 = \|S - P_4\| = \sqrt{(x-1)^2 + (y-0)^2}. \quad (8)$$

Возведем левую и правую части каждого из уравнений в квадрат, а также вычтем из расстояния D_1 расстояния D_2 , D_3 и D_4 , тогда получим:

$$D_1^2 - D_2^2 = 1 - 2x; \quad (9)$$

$$D_1^2 - D_3^2 = 2 - 2x - 2y; \quad (10)$$

$$D_1^2 - D_4^2 = 1 - 2y. \quad (11)$$

Подставим в выражения (9), (10) и (11) вместо расстояний D_1 , D_2 , D_3 и D_4 радиус r и расстояния d_2 , d_3 и d_4 , раскроем скобки, сгруппируем слагаемые, получим следующие уравнения:

$$2x - 2d_2r = d_2^2 + 1; \quad (12)$$

$$2x + 2y - 2d_3r = d_3^2 + 2; \quad (13)$$

$$2y - 2d_4r = d_4^2 + 1. \quad (14)$$

На основе уравнений (12), (13) и (14) составляется матрица следующего вида:

$$\begin{vmatrix} 2 & 0 & -2d_2 \\ 2 & 2 & -2d_3 \\ 0 & 2 & -2d_4 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x \\ y \\ r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} d_2^2 + 1 \\ d_3^2 + 2 \\ d_4^2 + 1 \end{vmatrix}. \quad (15)$$

В статье [5] матрицу (15) предлагается решить с помощью программного обеспечения **MATLAB**, либо с помощью трех вспомогательных матриц: матрицы трансляции (перемещения), матрицы масштабирования и матрицы вращения. Мы применим численный метод решения, который будет реализован путем подстановки в матрицу координат нескольких точек возможного удара для того, чтобы оценить, насколько точно осуществляется определение координат места удара в зависимости от расстояния от места предполагаемого удара до места размещения пьезодатчиков. Неизвестными величинами при подстановке в матрицу (15) координат x и y , а также радиуса r , остаются расстояния d_2 , d_3 и d_4 . Найти эти расстояния не составляет труда при использовании программного обеспечения **MathCAD 14**. После того как все неизвестные величины найдены, полученные значения подставляются в исходную матрицу, и левая ее часть сравнивается с правой. Далее формулируется вывод о возникших погрешностях.

Предположим, что удар произошел в точке с координатами (5, 4). Найти радиус r окружности, показанной на рис. 2, можно, используя

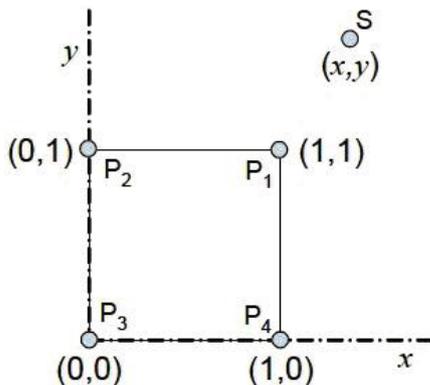


Рис. 1. Пьезодатчики и место удара в декартовой системе координат

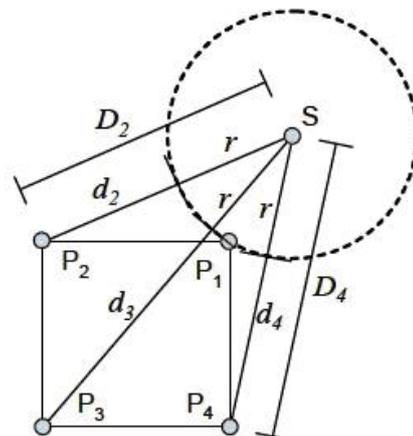


Рис. 2. Расстояния от места удара до пьезодатчиков

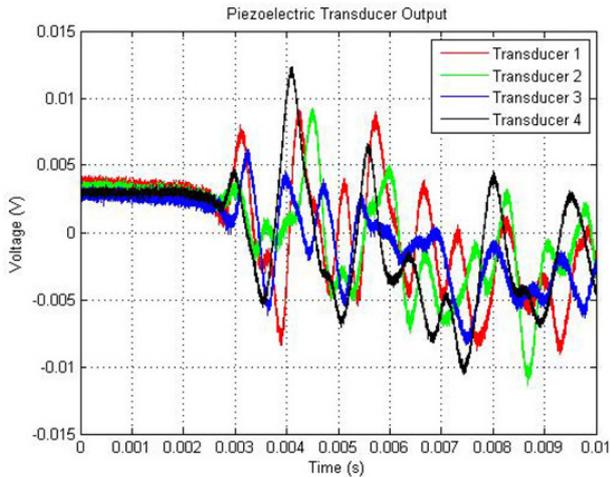


Рис. 3. Выходной сигнал пьезоэлектрического датчика (без усиления) [5]

уравнение окружности, центр которой расположен не в начале координат:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2, \quad (16)$$

где a и b – координаты центра окружности; x и y – координаты точки, принадлежащей окружности. В нашем случае окружности с радиусом r принадлежит точка P_1 с координатами (1, 1), значит, в качестве x и y используются именно эти координаты; r – радиус окружности.

Тогда радиус $r = 5$. Подставим данные в матрицу (15), с помощью MathCAD находим $d_2 = 0,831$, $d_3 = 1,403$ и $d_4 = 0,657$. В результате подстановки всех данных, получаем расхождение значений правой части матрицы и ее левой части, равное 0,12 %.

Следующая точка – точка с координатами (10, 9). Радиус $r = 12$, $d_2 = 0,767$, $d_3 = 1,416$ и $d_4 = 0,689$. В результате подстановки данных расхождение составило 0,73 %.

Следующая точка – точка с координатами (18, 15). Радиус $r = 22$, $d_2 = 0,782$, $d_3 = 1,409$ и $d_4 = 0,65$. В результате подстановки данных расхождение составило 1,6 %.

Следующая точка – точка с координатами (40, 30). Радиус $r = 48,6$, $d_2 = 0,782$, $d_3 = 1,409$ и $d_4 = 0,65$. В результате подстановки данных расхождение составило 1,8 %.

И наконец, возьмем точку с координатами (50, 49). Радиус $r = 68,6$, $d_2 = 0,718$, $d_3 = 1,414$ и $d_4 = 0,703$. В результате подстановки данных расхождение составило 3,5 %.

Отметим, что существенное влияние на показания пьезодатчиков оказывают внешние шумы различных уровней. В лабораторных условиях уровни электрического и механического шума являются постоянными и данные шумы легко

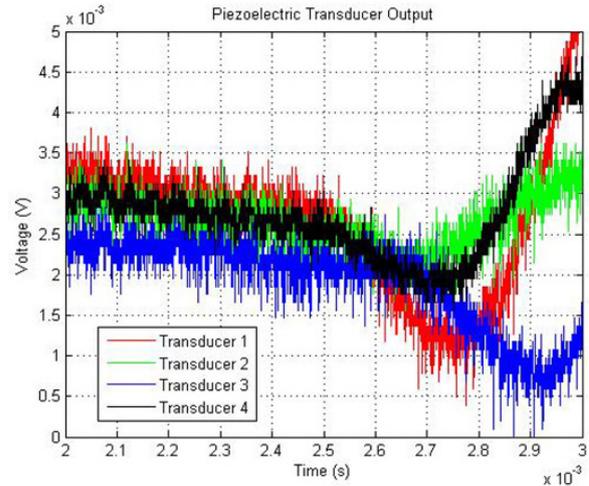


Рис. 4. Выходной сигнал пьезоэлектрического датчика (с усилением) [5]

могут быть устранены или уменьшены путем использования экранирования, фильтрации или простых методов обработки сигналов [5].

Однако, эти подходы не годятся для измерений в процессе полета в связи с непредсказуемым характером источников шума. Механическая вибрация и детонация из-за аэродинамических эффектов будет значительно изменяться во время полета, вызывая отклонения сигналов на электрических выходах датчиков. Также пьезоэлектрические приборы и подключенные к ним провода подвержены влиянию электромагнитных помех. Эти факторы приводят к нежелательному вкладу в общий сигнал на выходе пьезодатчиков, часто маскируют ранние признаки воздействия, которые могут быть ошибочно приняты за шум при использовании традиционных методов обработки сигнала [5].

На рис. 3 показаны данные с четырех пьезодатчиков, которые иллюстрируют трудности в определении времени поступления сигнала после удара. Даже на увеличенном графике (рис. 4) не видно, когда происходит удар частицы в корпус КА, что приводит к неопределенности в определении места удара.

Цифровая фильтрация может помочь уменьшить некоторые шумы, но не устраняет проблему полностью. Для этой цели может быть применен цифровой полосовой фильтр Баттерворта четвертого порядка со значением нижней граничной частоты $f_1 = 80$ Гц и верхней граничной частоты $f_2 = 25$ кГц с последующим Фурье-анализом сигнала [5].

Заключение

Как видно из полученных результатов, чем дальше от пьезодатчиков происходит удар вы-

сокоскоростной частицы о корпус космического аппарата, тем выше погрешность определения координат данного удара. Регистрация удара с наибольшей точностью происходит в том случае, если частица попадает в корпус КА как можно ближе к месту размещения пьезодатчиков. Вызвано это достаточно слабой чувствительностью пьезодатчиков к удаленным от их места размещения ударам. Решить данную проблему можно, разместив несколько пьезодатчиков по периметру обшивки космического аппарата.

2. URL: http://edu.dvgups.ru/METDOC/GDTRAN/NTS/VA-GON/SIS_AVT_PR/METOD/IGUMNOV/Arame/3_4.htm.
3. Семкин Н.Д., Телегин А.М. Преобразователь информации в электронных устройствах бортовых систем: учеб. пособие. Самара: СГАУ, 2012. 306 с.
4. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
5. Ross R.W. Structural health monitoring and impact detection using neural networks for damage characterization // American Institute of Aeronautics and Astronautics. Hampton, USA, 2006. 11 p.

Список литературы

1. Регистрация космической пыли искусственного и естественного происхождения / Н.Д. Семкин [и др.] // Прикладная физика. 2009. № 1. С. 86–102.

The use of piezotransducers for determining the impact point of high-speed particles on the surface of the spacecraft

D.N. Novomejsky, A.M. Telegin, N.D. Semkin

Reviewed the question particle using piezotransducers, the principle of piezotransducers, their classification and the equation of the piezoeffect. In addition, given the technique of determining the coordinates of the impact point high-speed particles on the body of the spacecraft.

Keywords: classification, piezotransducers, piezoelectric effect, the matrix, the coordinates of the impact point of the particles.
