

10

Теоретический анализ влияния условий закрепления на чувствительность пассивного беспроводного акселерометра на поверхностных акустических волнах

© А.С. Кукаев, М.А. Сорвина

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: masorvina@etu.ru

Поступило в Редакцию 11 марта 2026 г.

В окончательной редакции 4 мая 2026 г.

Принято к публикации 5 мая 2026 г.

Рассматриваются инерциальные датчики на поверхностных акустических волнах (ПАВ), пригодные для пассивного беспроводного считывания. Выполнен теоретический анализ влияния механического закрепления пьезоэлектрической подложки на временную задержку ПАВ и чувствительность акселерометра. Предложена аналитическая модель, объединяющая балочную теорию упругости и теорию возмущений акустических волн. Исследованы три схемы закрепления: консольная, двусторонняя и консольная с инерционной массой. Получены выражения для временной задержки в зависимости от ускорения, геометрии и свойств материала.

Ключевые слова: поверхностные акустические волны, ПАВ-акселерометр, временная задержка, чувствительность, механические граничные условия, инерционная масса.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.15.63401.20675

Поверхностные акустические волны (ПАВ) широко применяются в сенсорных устройствах для измерения температуры, давления, деформаций и других физических величин благодаря высокой добротности, возможности пассивного беспроводного считывания и совместимости с микротехнологиями [1]. В обзоре [2] систематизированы основные принципы построения ПАВ-датчиков, включая типы антенн и материалов, однако вопросы акселерометрии затронуты лишь в общем виде. В работе [3] предложена конструкция ПАВ-акселерометра и проведено экспериментальное сравнение различных подходов к проектированию чувствительного элемента, однако аналитическая модель, связывающая схему механического закрепления подложки с чувствительностью датчика, не была развита. Жао [4] рассмотрел конструкцию балки равного сопротивления для акустического акселерометра, но ограничился единственной схемой закрепления. В работах [5,6] исследованы вопросы оптимизации геометрических параметров резонаторов на ПАВ, однако влияние граничных условий на характеристики акселерометра в них не анализировалось.

Целью настоящей работы является разработка аналитической модели, позволяющей количественно оценить и сравнить чувствительность пассивного беспроводного ПАВ-акселерометра при трех типах механического закрепления подложки: консольном, двустороннем и консольном с инерционной массой (рис. 1). В модели приняты следующие упрощения. Подложка рассматривается как тонкая упругая балка с постоянным сечением, прогибы малы по сравнению с длиной. Влияние напряжений на скорость ПАВ считается малым и описывается линейным приближением (см. далее выражение (1)). Подложка изготовлена из однородного материала. Вли-

яние электродов встречно-штыревого преобразователя (ВШП) и отражателей на жесткость подложки не учитывается. Температурные эффекты и затухание волны не рассматриваются. Полученные результаты дают возможность обоснованного выбора схемы закрепления на этапе проектирования датчика в зависимости от требуемого компромисса между чувствительностью и механической прочностью.

Линия задержки, включающая ВШП и отражатели R_1 и R_2 (рис. 2), расположена на верхней поверхности пьезоэлектрической подложки (рис. 1). При действии ускорения подложка испытывает изгибные деформации, и возникающие на верхней поверхности продольные механические напряжения $\sigma(x)$ непосредственно воздействуют на область распространения ПАВ между отражателями. Именно это позволяет связать механическую модель изгиба балки с акустической моделью возмущения скорости волны, описываемой далее выражением (1).

ВШП представляет собой набор чередующихся электродов, нанесенных на поверхность пьезоэлектрической подложки. При подаче переменного напряжения $U(t)$ с частотой f_0 за счет обратного пьезоэффекта возбуждается ПАВ. Волна распространяется вдоль поверхности и частично отражается от отражателей R_1 и R_2 , возвращаясь к ВШП. Отражатели представляют собой периодические металлические полоски или канавки, создающие частичное отражение акустической волны.

На рис. 1, а показана консольная схема закрепления чувствительного элемента: левый конец подложки жестко фиксирован, а внешнее ускорение создает распределенную инерционную нагрузку вдоль балки.

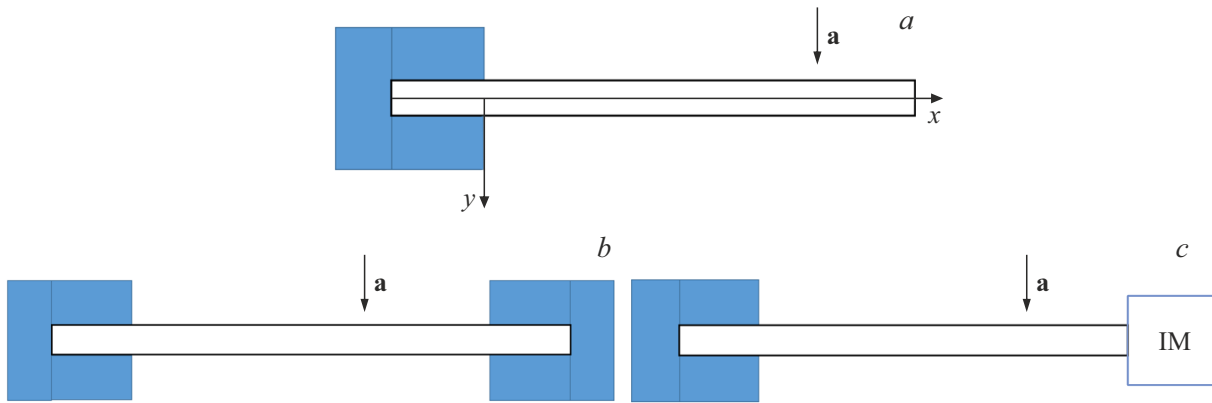


Рис. 1. Расчетные схемы механического закрепления пьезоэлектрической подложки ПАВ-акселерометра. *a* — консольное закрепление, *b* — закрепление с двух сторон, *c* — консольное закрепление с инерционной массой.

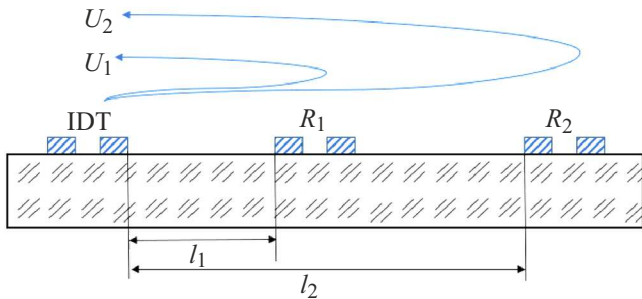


Рис. 2. Концепция беспроводного линейного чувствительного элемента. IDT — interdigital transducer (встречно-штыревой преобразователь).

Изгибающий момент и напряжение на верхней поверхности для такого закрепления

$$M(x) = -\frac{\rho A a (L-x)^2}{2},$$

$$\sigma(x) = \frac{M(x)h}{2I_z} = \frac{\rho A a h}{4I_z} (L-x)^2,$$

где ρ — плотность среды, A — площадь поперечного сечения балки, a — действующее ускорение, h — высота балки, I_z — момент инерции, L — длина балки, x — расстояние от точки закрепления до точки приложения силы [7]. Скорость волны $v(x)$ изменяется под действием напряжения $\sigma(x)$:

$$v(x) = v_{R0}(1 + K_\sigma \sigma(x)), \quad (1)$$

где v_{R0} — скорость ПАВ в ненапряженном состоянии, K_σ — коэффициент относительного изменения скорости ПАВ [8]. Время прохождения T вычисляется интегриро-

ванием обратной скорости

$$\begin{aligned} T &= \int_0^L \frac{dx}{v(x)} = \frac{1}{v_{R0}} \int_0^L \frac{dx}{1 + n(L-x)^2} \\ &= \frac{1}{v_{R0}\sqrt{n}} \arctan(L\sqrt{n}), \end{aligned}$$

где $n = K_\sigma \frac{\rho A a h}{4I_z}$.

Таким образом, при наличии ускорения разность времен прихода сигналов от отражателей R_1 и R_2 , размещенных на расстояниях l_1 и l_2 :

$$\Delta T = \frac{2}{v_{R0}\sqrt{n}} (\arctan(l_2\sqrt{n}) - \arctan(l_1\sqrt{n})).$$

Полученное выражение описывает зависимость временной задержки между импульсами отраженного сигнала от параметров изгиба подложки, пьезоэлектрических свойств и геометрических характеристик элемента.

Если ускорение отсутствует, то выражение выглядит следующим образом:

$$\Delta T_0 = \frac{2}{v_{R0}} (l_2 - l_1).$$

Тогда поправка за счет ускорения определяется как разность между временем распространения волны в ненагруженном и нагруженном состояниях

$$\Delta T_a = \Delta T_0 - \Delta T.$$

Поправка ΔT_a прямо пропорциональна действующему ускорению и параметрам материала подложки. Увеличение ускорения, плотности или длины чувствительного участка приводит к росту временной задержки, тогда как повышение жесткости материала или скорости распространения ПАВ снижает чувствительность датчика.

Предложенная модель позволяет аналитически оценивать чувствительность ПАВ-акселерометра при консольном закреплении подложки и служит базой для последующего сравнения с другими схемами механического закрепления.

Задаваемые параметры сенсора и внешнего воздействия

Параметр	Значение
Толщина балки h , mm	0.5
Ширина балки b , mm	5
Площадь сечения балки A , m ²	$2.5 \cdot 10^{-6}$
Длина балки L , mm	30
Расстояние до первого отражателя l_1 , cm	0.1
Расстояние до второго отражателя l_2 , cm	3
Подаваемое ускорение a , m/s ²	100
Инерционная масса m , mg	100
Параметры ниобата лития	
Плотность ρ , kg/m ³	4640
Скорость распространения ПАВ v_{R0} , m/s	3488
Коэффициент относительного изменения скорости ПАВ K_σ , Pa ⁻¹	$2 \cdot 10^{-10}$

Рассмотрим чувствительный элемент ПАВ-акселерометра при симметричном механическом закреплении пьезоэлектрической подложки с двух сторон (рис. 1, б). Изгибающий момент может быть записан в виде

$$M(x) = \frac{\rho A a}{12} (6Lx - 6x^2 - L^2),$$

где $x \in [0, L]$ — координата вдоль подложки. Максимальные изгибающие деформации и механические напряжения возникают в центральной части подложки, тогда как вблизи точек закрепления напряжения стремятся к нулю. В отличие от консольной схемы отсутствует выраженная зона концентрации напряжений в области заделки.

Такое распределение напряжений приводит к меньшему интегральному изменению скорости ПАВ вдоль линии задержки. В результате поправка к временной задержке отраженных сигналов при действии ускорения оказывается меньше, чем при консольном закреплении. Соответственно чувствительность акселерометра снижается, однако повышается механическая устойчивость конструкции и расширяется допустимый диапазон ускорений.

Рассмотрим модификацию консольной схемы, в которой на свободном конце пьезоэлектрической подложки размещена дополнительная инерционная масса m (рис. 1, с). Данная конфигурация используется для увеличения чувствительности ПАВ-акселерометра при ограниченных габаритах чувствительного элемента.

При действии ускорения a на инерционную массу m на свободном конце подложки возникает сосредоточенная инерционная сила

$$F_m = ma,$$

которая создает дополнительный изгибающий момент вдоль подложки

$$M_m(x) = ma(L - x).$$

Это увеличивает изгибающий момент в области заделки и, как следствие, механические напряжения в зоне распространения ПАВ. В результате возрастает интегральное изменение скорости волны и увеличивается поправка к временной задержке отраженных сигналов.

Анализ модели показывает, что вклад инерционной массы линейно зависит от ее величины, что позволяет регулировать чувствительность акселерометра без изменения материала подложки и длины чувствительного элемента. При этом увеличение массы сопровождается снижением механической прочности и уменьшением предельного диапазона измеряемых ускорений. Кроме того, наличие сосредоточенной массы на свободном конце подложки приводит к возникновению дополнительных механических напряжений при действии продольного ускорения (вдоль оси x), что может вносить погрешность в определение поперечного ускорения (вдоль оси y), являющегося измеряемым параметром. Величина данной перекрестной чувствительности возрастает с увеличением инерционной массы, и ее оценка требует отдельного анализа, выходящего за рамки настоящей работы. Таким образом, данная схема наиболее эффективна для измерения малых и средних ускорений в условиях, когда продольные ускорения пренебрежимо малы либо могут быть скомпенсированы.

Для количественного сравнения трех схем закрепления выполнен расчет с параметрами чувствительного элемента, приведенными в таблице. Результаты моделирования сведены в сравнительный график (рис. 3), где по оси абсцисс отложено ускорение a , а по оси ординат — изменение временной задержки ΔT . Кривые показывают линейный характер зависимости во всех случаях, но с разными углами наклона, что отражает различие в чувствительности.

Видно, что консольное закрепление обеспечивает наибольшую чувствительность, однако характеризуется меньшей механической стабильностью и боль-

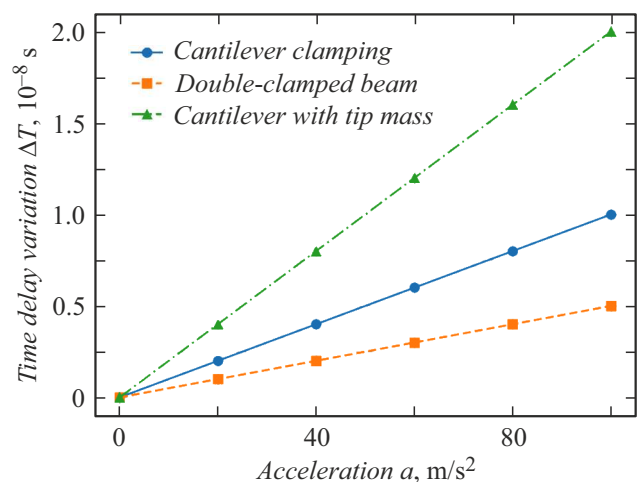


Рис. 3. Сравнение влияния способов закрепления на временную задержку ПАВ.

шей восприимчивостью к внешним воздействиям. Двустороннее закрепление демонстрирует минимальную чувствительность, но обеспечивает высокую устойчивость и воспроизводимость характеристик, что важно для метрологических и промышленных применений.

Консольная схема с инерционной массой позволяет существенно увеличить изгибающий момент и соответственно изменение скорости ПАВ при малых габаритах подложки. Однако повышение чувствительности сопровождается снижением механической прочности и ударной стойкости по сравнению со случаем двустороннего закрепления.

Полученные результаты справедливы при малых деформациях подложки, что соответствует ускорениям порядка единиц-десятков g . При больших ускорениях линейное приближение может оказаться недостаточным. Кроме того, реальные пьезоэлектрические материалы, например LiNbO_3 , обладают анизотропией свойств, что может приводить к отклонениям от предсказаний модели. Для уточнения результатов целесообразно провести численное моделирование методом конечных элементов.

В настоящей работе верификация модели путем сравнения с экспериментальными данными или численным моделированием не проводилась, поскольку целью являлось получение аналитических выражений, позволяющих качественно и количественно сравнить влияние различных схем закрепления на чувствительность датчика. Вместе с тем балочная теория для расчета напряжений и линейная теория возмущений для описания изменения скорости ПАВ хорошо апробированы и применялись, в частности, в работе [6] при проектировании ПАВ-акселерометра. Полученные качественные закономерности (наибольшая чувствительность у консольной схемы с инерционной массой, наименьшая — у двустороннего закрепления) согласуются с известными результатами для балочных акселерометров.

Таким образом, выбор схемы закрепления определяется требуемым компромиссом между чувствительностью и прочностью конструкции. Для измерения малых ускорений предпочтительна консоль с инерционной массой, тогда как для длительной эксплуатации в составе встроенных систем более целесообразно двустороннее закрепление.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках гранта РНФ 23-79-10259.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Mandal, S. Banerjee, *Sensors*, **22** (3), 820 (2022). DOI: 10.3390/s22030820
- [2] R. Kumar, N. Mandal, *IEEE Sens. J.*, **24** (5), 5713 (2024). DOI: 10.1109/JSEN.2024.3349656
- [3] S. Shevchenko, A. Kukaev, M. Khivrich, D. Lukyanov, *Sensors*, **18** (7), 2301 (2018). DOI: 10.3390/s18072301
- [4] Y. Zhao, J. Zhou, L. Kuang, Y. Guo, J. Xie, Y. Fu, *Phys. Scripta*, **98**, 125205 (2023). DOI: 10.1088/1402-4896/ad582
- [5] С.Ю. Шевченко, Д.А. Михайленко, *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*, **26** (2), 89 (2023). DOI: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-89-100
- [6] A. Kukaev, E. Shalymov, S. Shevchenko, M. Sorvina, V. Venediktov, *Sensors*, **25** (3), 877 (2025). DOI: 10.3390/s25030877
- [7] С.П. Тимошенко, *Сопротивление материалов* (Наука, М., 1965), т. 1.
- [8] О.Л. Балышева, *Материалы для акустоэлектронных устройств* (ГУАП, СПб., 2005).