АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРУЕМОГО ВОЛНОВОДНОГО СЕНСОРНОГО ЭЛЕМЕНТА УСТРОЙСТВА ВВОДА СИМВОЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Жураева Нафиса Иноятовна[1], *Байпакбаева Салтанат Туркестанкызы*[2]

[1]*Каршинский государственный технический университет*
[2]*Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий*
E-mail: yuldashevna12@gmail.com

K E Y W O R D S

волноводный сенсорный элемент, символьная информация, полимерный световод, деформация, аналитическая модель, чувствительность, фотоэлектрический приёмник

A B S T R A C T

Разработана параметрическая аналитическая модель деформируемого волноводного сенсорного элемента устройства ввода символьной информации, связывающая локальную силу нажатия, деформацию направляющей структуры, изменение её геометрического параметра, волноводный отклик и регистрируемый электрический сигнал. Для малых деформаций получено линейное приближение с эффективным коэффициентом преобразования; разложение до второго порядка использовано для задания границы линейного режима. Сформулированы локальная чувствительность, приближённая оценка параметрической неопределённости и критерий физической различимости, из которого получена расчётная оценка минимально регистрируемой локальной силы. Показано, что по зависимости «сила – выходной сигнал» непосредственно оценивается составной коэффициент преобразования, тогда как раздельное определение механической, волноводной и приёмной составляющих требует дополнительных измерений. Модель сопоставлена с ранее опубликованными данными оптического прототипа: изменение сигнала около 20 мВ при шаге аналогового входа около 4 мВ рассматривается только как подтверждение разрешимости отклика конкретным измерительным трактом. Предложенная модель предназначена для расчётной оценки чувствительности и последующей экспериментальной калибровки первичного сенсорного звена.

Введение

Устройства ввода символьной информации применяются в радиотехнических терминалах, встраиваемых системах управления и человеко-машинных интерфейсах. Для герметизируемых и защищённых панелей актуальны сенсорные принципы, не требующие электрического контакта непосредственно в активной зоне ввода.

Одним из таких направлений являются оптические и волноводные сенсоры, в которых механическое воздействие преобразуется в изменение параметров распространяющегося излучения. Современные работы [8–10] показывают, что деформация гибких полимерных волноводов способна изменять интенсивность, потери и другие характеристики выходного сигнала.

В работах [1–5] с участием автора была сформирована экспериментальная и расчётная база устройств ввода с оптическим кодированием, полыми полимерными световодами и фотоэлектрическими приёмниками; патенты [6, 7] закрепили конструктивные варианты. Вместе с тем требовалась единая параметрическая связь

(cc) BY

между механическим воздействием и измеряемым электрическим откликом.

Цель работы — разработать параметрическую аналитическую модель деформируемого волноводного сенсорного элемента, определить границы линейного приближения, показатели чувствительности и физической различимости, а также проанализировать идентифицируемость параметров. Научный результат состоит в разделении механического, волноводного и приёмного преобразований и выводе расчётных критериев, связывающих параметры сенсорного звена с минимально регистрируемой локальной силой.

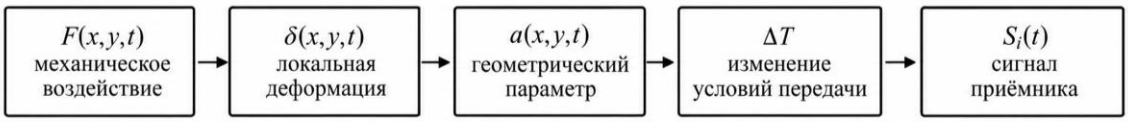
1. Анализ аналогичных подходов и постановка задачи

В деформируемых оптических сенсорах механическое воздействие может изменять интенсивность, изгибные потери, условия ввода/вывода света и распределение поля [8–10]. Полимерные материалы удобны благодаря механической податливости и возможности согласования диапазона нагрузок с чувствительностью оптического тракта.

Для устройства ввода символьной информации требуется локальный отклик, однозначно связанный с зоной нажатия и превышающий предел различения измерительного тракта. Поэтому модель должна последовательно описывать переходы «сила → деформация → геометрический параметр → волноводный отклик → электрический сигнал».

Постановка задачи формулируется следующим образом. Пусть на локальную область рабочей поверхности действует механическое воздействие $F(x, y, t)$. Оно вызывает локальную деформацию направляющей структуры $\delta(x, y, t)$, изменяющую некоторый геометрический параметр $a(x, y, t)$. Изменение геометрии модифицирует интегральный параметр передачи, рассеяния или отражения T . Приёмный канал j преобразует соответствующий физический отклик в электрический сигнал $S_j(t)$. Требуется получить аналитическую связь между этими величинами и выделить параметры, которые могут быть определены экспериментально или численно для конкретной реализации.

В настоящей работе $F(x, y, t)$ трактуется как эффективная локальная нормальная сила, действующая на активную зону с координатами (x, y), и измеряется в ньютонах. Если нагрузка задана распределённым давлением, то $F(x, y, t)$ понимается как результирующая сила на соответствующей активной площадке. Такое определение исключает смешение силы и давления и делает размерность коэффициента податливости однозначной для выбранного геометрического параметра.



$$a = a_0 - \delta; \quad \delta = \alpha F; \quad S_i = S_{0i} + K_i \cdot \Delta T + \eta_i$$

Рис. 1. Физическая цепочка преобразования в деформируемом волноводном сенсорном элементе

2. Обобщённая аналитическая модель сенсорного элемента

В качестве параметра состояния направляющего элемента введём a_0 — его значение в ненагруженной рабочей точке. В конкретной конструкции этим параметром может служить поперечный размер полого световода, расстояние между его стенками, радиус кривизны либо другая геометрическая величина, влияющая на распространение излучения. При локальном воздействии параметр изменяется; текущее значение запишем как

$$a(x, y, t) = a_0 - \delta(x, y, t).$$

(cc) BY

ISSN: 3030-3346

В области малых обратимых деформаций первым приближением является локальная пропорциональность деформации приложенному воздействию:

$$\delta(x,y,t) = \alpha(x,y)F(x,y,t), \quad (2)$$

где $\alpha(x,y)$ — локальный коэффициент податливости, зависящий от материала, толщины, поперечного сечения, условий закрепления и положения зоны воздействия. Параметр α не рассматривается как универсальная константа; он должен определяться расчётом механики конкретной конструкции либо калибровкой. Если геометрический параметр и деформация выражены в единицах длины, размерность локальной податливости равна длина/Н.

Интегральный волноводный отклик описывается функцией $T(a)$. В оптической реализации она может характеризовать эффективную передачу, перераспределение мощности или интегральное рассеяние в направлении приёмника. Изменение относительно ненагруженного состояния равно

$$\Delta T(x,y,t) = T\big(a_0 - \delta(x,y,t)\big) - T(a_0). \quad (3)$$

Сигнал j -го приёмного канала представим в виде

$$S_j(t) = S_{0j} + K_j(x,y)\Delta T(x,y,t) + \eta_j(t), \quad (4)$$

где S_{0j} — базовый уровень канала, $K_j(x,y)$ — коэффициент преобразования волноводного отклика в электрический сигнал, а $\eta_j(t)$ — совокупная шумовая и неучтённая составляющая. Соотношения (1)–(4) образуют базовую нелинейную модель. Её принципиальное преимущество состоит в разделении трёх физически различных звеньев: механического $(F \to \delta)$, волноводного $(\delta \to \Delta T)$ и приёмного $\big(\Delta T \to S_j\big)$.

Соотношения (1)–(4) образуют редуцированную модель преобразования, а не полное решение электродинамической задачи. Функция $T(a)$ для конкретной реализации может определяться аналитическим расчётом, численным моделированием или калибровочным экспериментом.

3. Второй порядок и границы линейного приближения

Для расчётного использования линейного приближения необходимо явно определить область его применимости. В окрестности ненагруженной рабочей точки разложим $T(a_0 - \delta)$ в ряд Тейлора до второго порядка:

$$T(a_0 - \delta) = T(a_0) - T'(a_0)\delta + \frac{1}{2}T''(a_0)\delta^2 + O(\delta^3). \quad (5)$$

Подставляя (2) в (5) и учитывая (4), для приращения сигнала $\Delta S_j = S_j - S_{0j}$ получаем

$$\Delta S_j(t) \approx G_{1j}(x,y)F(x,y,t) + G_{2j}(x,y)F^2(x,y,t) + \eta_j(t), \quad (6)$$

где

$$G_{1j}(x,y) = -K_j(x,y)T'(a_0)\alpha(x,y), \quad (7)$$

$$G_{2j}(x,y) = \frac{1}{2}K_j(x,y)T''(a_0)\alpha^2(x,y). \quad (8)$$

Коэффициент G_{1j} определяет локальную линейную чувствительность в окрестности ненагруженного состояния. Коэффициент G_{2j} характеризует первую существенную поправку, обусловленную кривизной передаточной характеристики $T(a)$. Введение G_{2j} важно методологически: оно показывает, что нелинейность выходного сигнала может быть связана не только с нелинейной механикой материала, но и с нелинейностью волноводного отклика при изменении геометрии.

При $G_{1j} \neq 0$ относительную величину квадратичной поправки можно оценить как

(cc) BY

$$\varepsilon_{nl}(F) = \left|\frac{G_{2j}F^2}{G_{1j}F}\right| = \left|\frac{\alpha F T\prime(a_0)}{2T\prime(a_0)}\right|.(9)$$

Если при проектировании задаётся максимально допустимая нелинейность ε_{max}, линейная модель применима в области

$$\varepsilon_{nl}(F) \le \varepsilon_{max}.(10)$$

4. Локальная чувствительность и параметрическая неопределённость

Для модели второго порядка локальная чувствительность сигнала к механическому воздействию определяется производной

$$Q_j(F) = \frac{\partial \Delta S_j}{\partial F} = G_{1j} + 2G_{2j}F.(11)$$

При $F \to 0$ выполняется $Q_j(0) = G_{1j}$. Поэтому G_{1j} можно рассматривать как малосигнальный коэффициент преобразования. Знак G_{1j} указывает направление изменения электрического сигнала при увеличении воздействия; для задачи регистрации нажатия принципиальна не сама полярность, а воспроизводимость и модуль изменения относительно фоновой неопределённости.

В линейном режиме эффективный коэффициент определяется произведением параметров механического, волноводного и приёмного звеньев. При независимых малых относительных неопределённостях их вклад в неопределённость результирующего коэффициента может быть оценён приближённо по формуле (12).

$$\frac{u(G_{1j})^2}{|G_{1j}|} \approx \frac{u(K_j)^2}{|K_j|} + \frac{u(T\prime(a_0))^2}{|T\prime(a_0)|} + \frac{u(\alpha)^2}{|\alpha|}.(12)$$

Формула (12) используется как инженерная оценка и не заменяет полный метрологический анализ. Она позволяет определить, какое из звеньев вносит основной вклад в разброс чувствительности.

Для многоканального устройства коэффициенты G_{1j} могут различаться по каналам из-за положения источника, неодинаковой геометрии световодов, сегментации приёмника и технологического разброса. Поэтому аналитическая модель непосредственно объясняет необходимость последующей поканальной калибровки и нормализации, но сама не включает цифровой алгоритм стабилизации: этот алгоритм является отдельным уровнем обработки.

5. Критерий физической различимости состояния нажатия

Для практического устройства важно, чтобы ненулевой отклик был различим измерительным трактом. Пусть минимальная локальная нормальная сила, которая должна регистрироваться, обозначена F_{min}, а ΔS_{lim} — совокупный предел различения, учитывающий шум, дрейф, квантование и другие неопределённости конкретного измерительного канала. Введём безразмерную маржу физической различимости

$$M_j = \frac{|\Delta S_j(F_{min})|}{\Delta S_{lim}}.(13)$$

Условие превышения полезного отклика над заданным пределом различения имеет вид $M_j > 1$. Здесь термин «различимость» используется в измерительном смысле и не относится к понятию наблюдаемости состояния в теории динамических систем. В линейном режиме

$$M_j \approx \frac{|G_{1j}|F_{min}}{\Delta S_{lim}}.(14)$$

Из условия $M_j = 1$ непосредственно следует расчётная оценка минимально регистрируемой локальной силы:

$$F_{min,det} \approx \frac{\Delta S_{lim}}{|G_{1j}|}.$$

Эта зависимость имеет прямой инженерный смысл: при фиксированном пределе различения уменьшение $F_{min,det}$ достигается увеличением модуля эффективного коэффициента преобразования $|G_{1j}|$ либо снижением неопределённости измерительного тракта. Полученная величина является расчётной характеристикой модели и должна подтверждаться отдельной калибровочной серией.

(cc) BY

6. Физическая интерпретация модели для оптического прототипа

Ранее разработанный оптический прототип [1–5] включал светодиодные источники, полые прозрачные полимерные световодные элементы, сегментированную солнечную фотоэлектрическую панель и микроконтроллерный блок. Последовательное включение источников обеспечивало опрос столбцов, а сегментация приёмника — идентификацию строки.

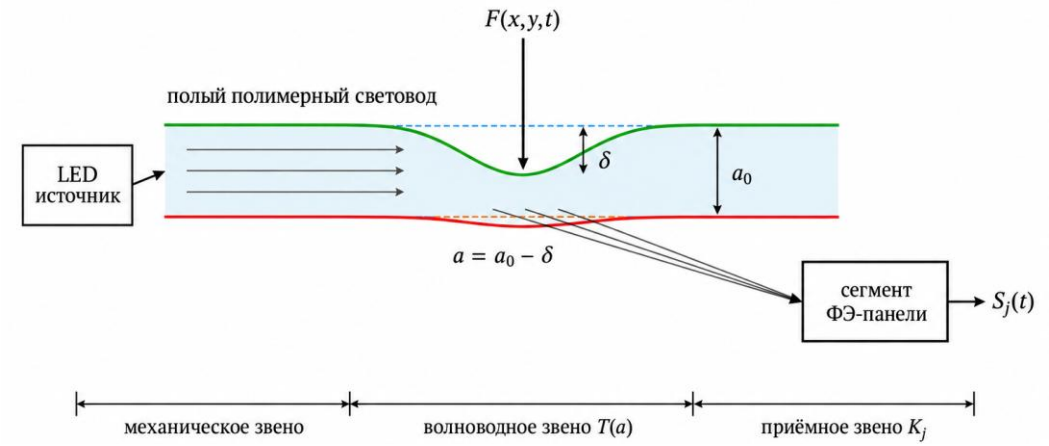


Рис.2. Физическая интерпретация параметров аналитической модели в оптическом сенсорном элементе

В терминах модели a_0 соответствует исходной локальной геометрии полого световода, δ — деформации в зоне нажатия, T(a) — интегральной характеристике распространения и рассеяния света в направлении фотоэлектрического сегмента, K_j — чувствительности конкретного сегмента и электронного тракта, а S_j — измеряемому электрическому сигналу. Именно такое соответствие переводит качественное описание принципа работы в форму, пригодную для калибровки.

В ранее опубликованном эксперименте регистрировались состояния без нажатия и при нажатии. При нагрузке 2,2 кОм и использовании ATmega328P/Arduino UNO разность уровней оценивалась примерно в 20 мВ при шаге аналогового входа порядка 4 мВ [5]. Эти значения относятся к прежнему прототипу и не являются новыми измерениями настоящей работы.

Отношение наблюдаемого изменения к одному шагу квантования составляет

$$R_q = \frac{20\ \text{мВ}}{4\ \text{мВ}} \approx 5. \quad (15)$$

Ранее опубликованные данные подтверждают физическую разрешимость отклика конкретного прототипа; новые результаты настоящей работы относятся к параметрической структуре модели и выведенным расчётным критериям.

7. Анализ идентифицируемости и процедура определения параметров

В линейном режиме входно-выходная зависимость определяется составным коэффициентом G_{1j}, который согласно (7) является произведением параметров механического, волноводного и приёмного звеньев. Поэтому при наличии только контролируемых значений локальной силы F и измеренного приращения ΔS_j может быть непосредственно оценён G_{1j}, но не его множители по отдельности. Следовательно, по одной лишь паре «сила – выходной сигнал» отдельные множители этого коэффициента не могут быть определены однозначно.

Для практического применения достаточно двух уровней идентификации: физически разложенного, когда параметры звеньев оцениваются отдельно, и сокращённого инженерного, когда по

(cc) BY

калибровочным данным определяется составной коэффициент преобразования.

8. Обсуждение

Предложенная модель описывает первичное преобразование механического воздействия в измеряемый сигнал и отделяет характеристики сенсорного элемента от цифровой обработки. Ранее опубликованный прототип подтверждает наличие регистрируемого отклика, однако полная метрологическая проверка требует новой контролируемой серии измерений.

Заключение

Разработана аналитическая модель деформируемого волноводного сенсорного элемента, связывающая локальное механическое воздействие, деформацию направляющей структуры, волноводный отклик и электрический сигнал. Получены критерий линейности, показатели чувствительности и физической различимости, а также определены условия идентификации параметров. Сопоставление с ранее опубликованным прототипом подтверждает физическую разрешимость отклика и задаёт основу для последующей калибровки.

Список использованной литературы

1. Кабдушев Ш.Б., Сулейменов И.Э., Шалтыкова Д.Б., Игликов И.В., Ермухамбетова Б.Б., Байпакбаева С.Т., Мун Г.А., Нуртазин А.А. Система ввода информации на основе солнечных фотоэлектрических панелей // Энергия будущего: инновационные сценарии и методы их реализации (WSEC-2017). – Астана, 2017. – Т. 3. – С. 201–206.
2. Vitulyova E.S., Baipakbayeva S.T., Suleimenov I.E. Use of Hollow Fiber-Optic Elements in Information Input Systems with Optical Coding // Proceedings of the Sixth International Conference on Advances in Computing, Communication and Information Technology (CCIT 2018). – Zurich, 2018. – P. 56–59. DOI: 10.15224/978-1-63248-149-8-40.
3. Baipakbayeva S.T., Suleimenov I.E. Development of a Technique for Calculating the Characteristics of Lightguiding Elements Based on Fourier Optics // Вестник АУЭС. – 2018. – № 2(41). – С. 39–47.
4. Витулёва Е.С., Байпакбаева С.Т., Сулейменов И.Э. Конструкция складывающихся клавиатур на основе солнечных фотоэлектрических панелей // Вестник КазНИТУ. – 2018. – № 3(127). – С. 107–113.
5. Suleimenov I.E., Shaltykova D.B., Baipakbayeva S.T., Mun G.A. Experimental Implementation of a Keyboard with Optical Coding Based on Solar Photovoltaic Panels // Вестник НИА РК. – 2018. – № 3. – С. 94–100.
6. Патент Республики Казахстан № 34497. Система для ввода символьной информации. Заявка № 2019/0412.1; приоритет 06.06.2019; публикация 07.08.2020.
7. Патент Республики Казахстан № 5667. Устройство ввода символьной информации. Заявка № 2020/0889.2; приоритет 30.09.2020; публикация 20.12.2020.
8. Leal-Junior A., Campos V., Frizera A., Marques C. Low-cost and high-resolution pressure sensors using highly stretchable polymer optical fibers // Materials Letters. – 2020. – Vol. 271. – 127810. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.127810.
9. Peng W., Liao Q., Song H. A nanograting-based flexible and stretchable waveguide for tactile sensing // Nanoscale Research Letters. – 2021. – Vol. 16. – Article 23. DOI: 10.1186/s11671-021-03488-0.
10. Wang X., Li Z., Su L. Soft Optical Waveguides for Biomedical Applications, Wearable Devices, and Soft Robotics: A Review // Advanced Intelligent Systems. – 2024. – Vol. 6. – 2300482. DOI: 10.1002/aisy.202300482.

(cc) BY