

РАДИОФОТОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПАЦИЕНТА НА КРОВАТИ. РАДИОЧАСТОТНАЯ ЧАСТЬ

Р.М. Муратов, А.А. Силантьева

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. Описана радиочастотная часть радиофотонной системы контроля положения пациента на кровати. Предложен метод обработки сигналов на основе нормализованного коэффициента модуляции, позволяющий определить брэгговские частоты адресных волоконных брэгговских структур (АВБС) и силу воздействия пациента. Приведены аналитические выражения для коэффициента модуляции и его нормализованной формы, а также зависимость нормализованного коэффициента модуляции от сдвига центральной брэгговской частоты для различных параметров оптического фильтра с наклонной линейной характеристикой (ОФНЛХ).

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики; адресные волоконно-брэгговские структуры; волоконные брэгговские решетки; контроль положения пациента.

Введение

Радиочастотная часть радиофотонной системы контроля положения пациента предназначена для обработки сигналов, полученных от фотонной части системы, и определения силы воздействия пациента на датчики. Точность определения положения пациента зависит от возможности точно измерить сдвиг брэгговских частот АВБС, вызванный механическим воздействием. В данной работе представлен метод, основанный на использовании коэффициента модуляции и его нормализованной формы, позволяющий повысить точность измерений.

Материалы и методы

Для обработки сигналов фотонной части системы введён коэффициент модуляции для огибающей биений адресных составляющих АВБС:

$$M'_{B1,2} = \frac{2T_{R1,2-}T_{R1,2+}}{T_{R1,2-}^2 + T_{R1,2+}^2}, M'_{B3,4} = \frac{2T_{R3,4-}T_{R3,4+}}{T_{R3,4-}^2 + T_{R3,4+}^2}. \quad (1)$$

Получим выражение для коэффициента модуляции, связывающее брэгговскую и основную разностную частоту обеих пар и параметры ОФНЛХ q и b :

$$M'_{B1,2}(\omega_{B1,2}) = \frac{(q\omega_{B1,2}+b)^2 - q^2\Omega_{A01,2}^2}{(q\omega_{B1,2}+b)^2 + q^2\Omega_{A01,2}^2}, M'_{B3,4}(\omega_{B3,4}) = \frac{(q\omega_{B3,4}+b)^2 - q^2\Omega_{A03,4}^2}{(q\omega_{B3,4}+b)^2 + q^2\Omega_{A03,4}^2}. \quad (2)$$

Величины брэгговских частот $\omega_{B1,2}$ и $\omega_{B3,4}$ меняются как результат приложения силы в диапазоне $(\omega_{Bmin}, \omega_{Bmax})$, который определяются параметрами системы. При этом монотонность коэффициентов модуляции (2), позволяет однозначно связать брэгговские частоты $\omega_{B1,2}$ и $\omega_{B3,4}$ с их величиной. Отметим, что величины коэффициентов модуляции (2) содержат полную информацию, необходимую для определения брэгговских частот $\omega_{B1,2}$ и $\omega_{B3,4}$.

Задача может быть упрощена при известных начальных условиях и частоте при отсутствии воздействия. Тогда коэффициент модуляции при $\omega_{Б1,2} = \omega_{Б3,4}$ можно считать равным 1 в силу равенства амплитуд составляющих, формирующих обе адресные частоты.

Такое отношение не изменит сильной нелинейности коэффициента модуляции, но, если взять в знаменателе (2) амплитуды соответствующих им составляющих, формирующих адресные частоты с равными амплитудами, получим нормированный коэффициент модуляции.

Построим измерительную характеристику системы контроля собственных колебаний ТП по нормированному коэффициенту модуляции:

$$M_{Б1,2;Б3,4}^H(\omega_{Б1,2;Б3,4}) = \frac{(q\omega_{Б1,2;Б3,4} + b)^2 - q^2\Omega_{АО1,2;АО3,4}^2}{T_{R1,2;R3,4}^2}. \quad (3)$$

Результаты исследования

На рисунке 1 показан пример зависимости нормированного коэффициента модуляции: нормированный коэффициент модуляции $M_{Б1,2;Б3,4}^H(\omega_{Б1,2;Б3,4})$ (зеленая и пурпурная линии) и силы воздействия пациентов, определенных через сдвиг брэгговских частот АВБС при сдвиге их центральных брэгговских частот и выраженных в условных единицах, в диапазоне $\omega_{Б} \in (\omega_{Бmin}, \omega_{Бmax})$, соответствующих полному диапазону измерения колебаний.

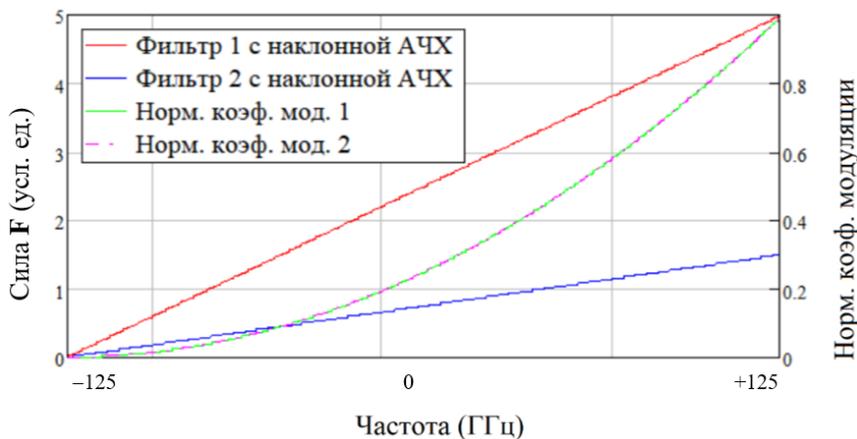


Рис. 1. Зависимость силы воздействия пациента и нормированного коэффициента модуляции от сдвига центральной брэгговской частоты АВБС для двух ОФНЛХ с различными параметрами наклона АЧХ

На рисунке 1 дополнительно показаны характеристики двух ОФНЛХ с различными характеристиками, что позволяет измерять силу воздействия пациента в разных диапазонах. Для ОФНЛХ1 сила может достигать 5 усл. ед., а для ОФНЛХ2 – 1,5 усл. ед. При этом показано, что значения нормированного коэффициента модуляции совпадают для обоих ОФНЛХ. Таким образом, нормированный коэффициент модуляции при любых $q \neq 0$ позволяет использовать его для определения смещения $\omega_{Б1,2;Б3,4}$ с одинаковой разрешающей способностью и, как следствие, при любой ненулевой разности между амплитудами составляющих, формирующих адресные частоты АВБС [3].

Отметим также, что две адресные частоты АВБС отличаются друг от друга. Если при этом адресная частота структуры мала (единицы ГГц), амплитуда составляющих, формирующих адресные частоты, не велика, а коэффициент модуляции близок к 1 и мало

меняется при сдвиге частоты. Этот недостаток, как видно из рисунка 1, при использовании нормализованного коэффициента модуляции устраняется.

Заключение

Разработана радиочастотная часть радиофотонной системы контроля положения пациента на кровати. Предложен метод на основе нормализованного коэффициента модуляции, позволяющий точно определять сдвиг брэгговских частот АВБС и, следовательно, силу воздействия пациента. Нормализация коэффициента модуляции устраняет зависимость от амплитуд адресных составляющих и позволяет использовать фильтры с различными характеристиками без потери точности. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного метода для обработки сигналов в медицинских системах мониторинга.

Благодарность

Авторы выражают благодарность за научное руководство профессору кафедры радиофотоники и микроволновой технологии КНИТУ-КАИ Морозову О.Г.

Список литературы

1. Морозов, О.Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиофотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43. – № 4. – С. 535-543.
2. Мисбахов, Р.Ш. Комбинированные двухкомпонентные многоадресные волоконные брэгговские структуры / Р.Ш. Мисбахов, Е.В. Куликов, В.И. Артемьев и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2024. – № 2 (62). – С. 57-73.
3. Мисбахов, Р.Ш. Радиофотонные квазираспределённые адресные сенсорные системы мониторинга и технического диагностирования состояния трубопроводов электростанций / Р.Ш. Мисбахов, Е.В. Куликов, В.И. Артемьев и др. // Электроника, фотоника и киберфизические системы. – 2025. – Т. 5. – № 2. – С. 52-68.

MICROWAVE PHOTONIC SYSTEM FOR MONITORING THE PATIENT'S POSITION ON THE BED. THE RADIOFREQUENCY PART

R.M. Muratov, A.A. Silantieva

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

Absrtact. The radiofrequency part of a microwave photonic system for monitoring a patient's position on a bed is described. A signal processing method based on a normalized modulation coefficient is proposed, allowing the determination of Bragg frequencies of addressed fiber Bragg structures and the force applied by the patient. Analytical expressions for the modulation coefficient and its normalized form are provided, as well as the dependence of the normalized modulation coefficient on the shift of the central Bragg frequency for various parameters of the optical filter with a slanted linear characteristic.

Keywords: fiber-optic sensors; addressable fiber-Bragg structures; fiber-Bragg gratings; patient position monitoring.

Статья представлена в редакцию 22 декабря 2025 г.