

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04078

研究課題名（和文）光ファイバケーブル外皮への加振によるセンサ情報伝送技術の研究

研究課題名（英文）Data Transmission System Using Modulated Vibration and Optical Fiber Vibration Sensor

研究代表者

真鍋 哲也（MANABE, TETSUYA）

三重大学・工学研究科・教授

研究者番号：60881175

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では光ファイバケーブルの外側に印加する振動信号を変調してセンサデータを伝送する方法を提案した。センサデータに基づいて変調された振動信号は光ファイバ振動センサで受信される。振動源を接触させるだけで容易に光ファイバケーブルを伝送路として活用することが可能な技術である。光ファイバ振動センサとしてマッハツェンダ干渉計を用いた場合の変復調方式およびスペクトル拡散方式による多重化を提案し実験により実現可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的に光ファイバにより情報伝送するためには光ファイバケーブル中の光ファイバと光送受信機と接続しなければならない。本研究成果は振動源を接触させるだけで容易に光ファイバケーブルを伝送路として利用できる非常に施工容易性の高い技術である。近年、橋梁、トンネル等の社会インフラのヘルスマモニタリングの重要性が高まっている。本研究成果は施工容易性が高いことから、FTH実現のために全国に敷設された既設の光ファイバネットワークを活用した広域のセンサネットワークを低コストな施工により実現することが可能となった。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a method of transmitting sensor data by modulating the vibration signal applied to the outside of an optical fiber cable. The modulated vibration signal based on the sensor data is received by the optical fiber vibration sensor. This technology enables the optical fiber cable to be easily utilized as a transmission line by simply contacting the vibration source. We proposed a modulation and demodulation method and multiplexing by spread spectrum method for the case where a Mach-Zehnder interferometer is used as an optical fiber vibration sensor, and demonstrated the feasibility of the method through experiments.

研究分野：光ファイバセンサ応用

キーワード：光ファイバ振動センサ センサ情報伝送 マッハツェンダ干渉計

1. 研究開始当初の背景

光ファイバセンシングは、橋梁、トンネル等の社会インフラのヘルスマonitoring技術の候補の1つである。これまでに多くの光ファイバセンシング技術の研究が行われてきた。たとえば、光ファイバへの温度・ひずみの分布計測技術としては、BOTDRが提案されている。また、近年では位相OTDRを用いた振動センシングに関する報告がなされており、光センシング技術による海底地震の観測や構造物の固有振動測定など新たなアプリケーションが模索されている。これまで研究が進められてきた光ファイバセンシング技術は、光ファイバ中に発生している温度・ひずみ・振動等を計測している。光ファイバケーブル外被や被覆に覆われた光ファイバのガラス部分と外部の環境には大きな乖離がある可能性がある。また、インフラモニタリングにおいて計測したい状態は振動、ひずみや温度変化など、光ファイバセンシングによりモニタリング可能な物理量だけではないということである。例えば構造物の傾斜、水位等、電気デバイスが得意とするような物理量のモニタリングでは光ファイバを信号伝送路として利用できる。しかしながら、光ファイバケーブルの外皮を切り裂いてひかり送受信機と接続する必要がある。光ファイバケーブルを簡易な施工によって各種センサの伝送路として活用可能な情報伝送方式が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究の目的はFTH実現のために全国に敷設された光ファイバネットワークを活用可能な各種インフラモニタリングのためのセンサ情報伝送技術を開発することである。そのために、各種センサデバイスからの情報を変調した振動として光ファイバケーブル外部から与えることで、簡易に施工可能なセンサ情報伝送技術の実現を目指す。

3. 研究の方法

I. 光ファイバケーブル内に構成された簡易な光ファイバ振動センサのモデル化

光ファイバケーブル中の2本の光ファイバマッハツェンダ干渉計を構築した時の光ファイバケーブル外部に与える振動と光ファイバ干渉計において観測される干渉信号との関係のモデル化を実施した。

・光ファイバケーブル内に構成された光ファイバ振動センサに応じた変復調方式の開発

光ファイバ振動センサとしてマッハツェンダ干渉計を用いた時のセンシング用光ファイバと参照用光ファイバに光路差がある場合のモデルに基づいて変復調方式を検討する。

4. 研究成果

I. 光ファイバケーブル内に構成されたマッハツェンダ干渉計による光ファイバ振動センサのモデル化

マッハツェンダ型光ファイバ干渉計により光ファイバ振動センサを構成した場合の構成を図1に示す。センシング用光ファイバおよび参照用光ファイバにおける電界を、それぞれ

$$E_1(t) = E_1 e^{i(\omega t + \varphi_1)} \quad (1)$$

$$E_2(t) = E_2 e^{i(\omega t + \varphi_2)} \quad (2)$$

とすると、受光器で観測される干渉波 $E(t)$ は

$$E(t) = E_1 e^{i(\omega t + \varphi_1)} + E_2 e^{i(\omega t + \varphi_2)} \quad (3)$$

となる。ただし、 ω はセンシング用光ファイバおよび参照用光ファイバを伝搬する光の角周波数、 φ_1 および φ_2 は位相である。このとき受光器の受信信号 $I(t)$ は、

$$I(t) = K |E(t)|^2 = K(E_1^2 + E_2^2 + 2 E_1 E_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)) \quad (4)$$

となる。ただし、 K は受光器の光入力と電気出力の間の係数である。

光ファイバケーブルに与えた振動を次式とする。

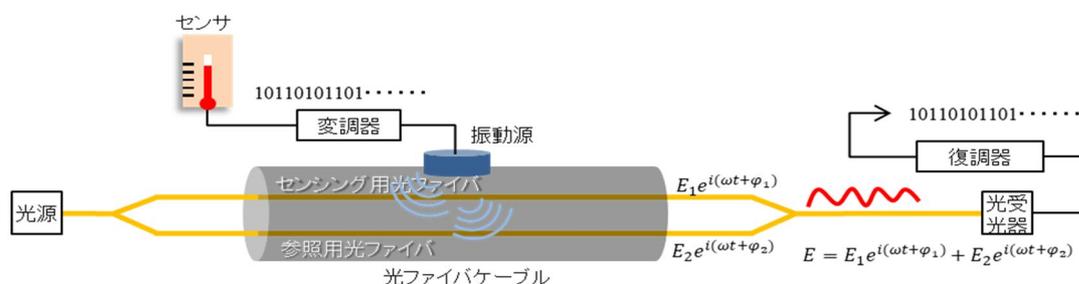


図1 マッハツェンダ干渉計による光ファイバ振

$$u(t) = A \cos(\omega_v t + \phi(t)) \quad (5)$$

ただし、 A は与えた振動の大きさと、振動により発生する位相差の間の関係を表す定数である。また、 ω_v は与えた振動の角周波数、 $\phi(t)$ は送信データに応じて変化させる変調位相である。ここで、マツハツェンダ型光ファイバ振動センサのセンシング用光ファイバと参照用光ファイバの光伝搬時間差による位相差を θ とすると、位相差は次式となる

$$\phi_1 - \phi_2 = A \cos(\omega_v t + \phi(t)) - \theta \quad (6)$$

式(4)、式(5)および(6)より、受信器で受信した受信信号 $I(t)$ は、

$$\begin{aligned} I(t) = K|E(t)|^2 = & KE_1^2 + KE_2^2 \\ & + 2K E_1 E_2 \left\{ \cos \theta \left\{ J_0(A) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(A) \cos 2n(\omega_v t + \phi(t)) \right\} \right. \\ & \left. + \sin \theta \left\{ 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} J_{2n-1}(A) \cos(2n-1)(\omega_v t + \phi(t)) \right\} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

となる。ただし、 $J_k(*)$ は第一種ベッセル関数である。この式(7)がマツハツェンダ干渉計の場合の与えた振動に対する観測される干渉波形のモデルとなる。

光ファイバケーブル内に構成された光ファイバ振動センサに応じた変復調方式の開発
ここでは、差動位相偏移変調(DPSK)と周波数ダイバーシティ受信を組み合わせた場合の結果について示す。式(7)に示す干渉波形の直流遮断フィルタ通過後の受信信号 $y(t)$ は

$$\begin{aligned} y(t) = & -C \cos \theta J_2(A) \cos(2\omega_v t + 2\phi(t)) + C \sin \theta J_1(A) \cos(\omega_v t + \phi(t)) \\ & + C \cos \theta \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(A) \cos 2n(\omega_v t + \phi(t)) \\ & + C \sin \theta \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^{n-1} J_{2n-1}(A) \cos(2n-1)(\omega_v t + \phi(t)) \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、 C は定数である。得られた式(8)の第1項および第2項に対して復調を行うことにより、マツハツェンダ型光ファイバ振動センサのセンシング用光ファイバと参照用光ファイバの屈折率や偏波の影響に起因した光伝搬時間差による位相差 θ の値が変動した場合においても受信データを復調することが可能になる。

送信データの変調には位相0および2/3を用いる差動位相偏移変調を用いる。ここで、 k 番目に送信する送信データを d_k とすると、実際に変調を行うデータ b_k は次式で得られる。

$$b_k = d_k \oplus b_{k-1} \quad (9)$$

ただし、演算子 \oplus は和分変換を表す。加算器により送信データ d_k と1シンボル前の b_{k-1} との和を求め、2で割った余りを b_k とする。次に式(9)で得られたデータ b_k に基づき搬送波の位相 ϕ_k を変調する。

$$\phi_k = \begin{cases} 0, & b_k = 0 \\ \frac{2}{3}\pi, & b_k = 1 \end{cases} \quad (10)$$

受信データの復調には光ファイバケーブルに与えた搬送波の振動と同じ周波数および2倍の周波数に対するDPSK復調を用いる。式(10)の位相変調により光ファイバケーブルに振動を与えた時の受信信号は、

$$\begin{aligned} y(t) = & -C \cos \theta J_2(A) \cos 2(\omega_v t + \phi_k + \alpha) + C \sin \theta J_1(A) \cos(\omega_v t + \phi_k + \alpha) \\ & + C \cos \theta \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(A) \cos 2n(\omega_v t + \phi_k + \alpha) \\ & + C \sin \theta \sum_{n=2}^{\infty} (-1)^{n-1} J_{2n-1}(A) \cos(2n-1)(\omega_v t + \phi_k + \alpha) \end{aligned} \quad (11)$$

となる。ただし、 α は同期復調のための搬送波に対する位相差である。この受信信号 $y(t)$ に対し

て直交復調後に遅延器にて1シンボル時間分遅延させた信号と乗算することで次の2つの復調信号 p_1, p_2 を得る.

$$p_1 = I_1 + Q_1 = D_1^2 \sin^2 \theta \cos(\phi_k - \phi_{k-1}) = \begin{cases} D_1^2 \sin^2 \theta, & b_k = b_{k-1} \\ -\frac{1}{2} D_1^2 \sin^2 \theta, & b_k \neq b_{k-1} \end{cases} \quad (12)$$

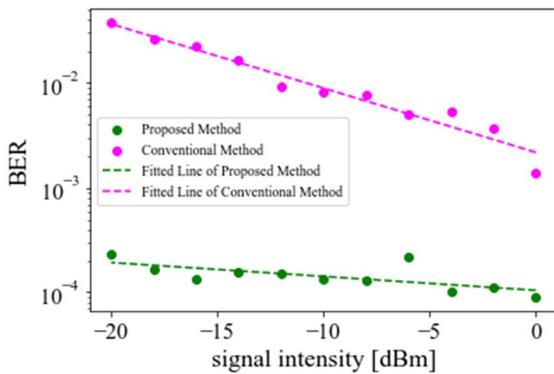
$$p_2 = I_2 + Q_2 = D_2^2 \cos^2 \theta \cos(2\phi_k - 2\phi_{k-1}) = \begin{cases} D_2^2 \cos^2 \theta, & b_k = b_{k-1} \\ -\frac{1}{2} D_2^2 \cos^2 \theta, & b_k \neq b_{k-1} \end{cases} \quad (13)$$

得られた復調信号 p_1, p_2 の大きさはマツハツェンダ型光ファイバ振動センサのセンシング用光ファイバと参照用光ファイバの長さや屈折率の差によって生じる光伝搬時間差による位相差 θ の状況により変化するので受信データの判別が相違する場合がある. よって, 識別器では式(12)および式(13)で表される2つの復調信号 p_1, p_2 より以下の基準により受信データの0, 1を判別する. まず, 各復調信号 p_1, p_2 より, 受信データの判別結果 R_1, R_2 を求める.

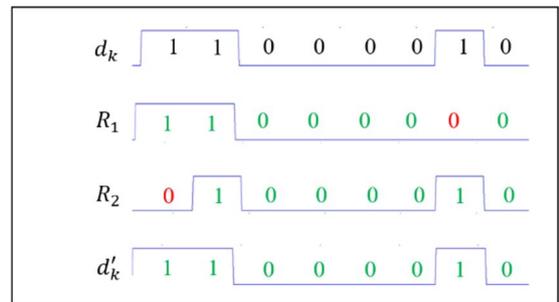
$$R_1 = \begin{cases} 0, & p_1 > 0 \\ 1, & p_1 \leq 0 \end{cases}, \quad R_2 = \begin{cases} 0, & p_2 > 0 \\ 1, & p_2 \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

2つの判定結果 R_1, R_2 に相違が無い場合は次式で受信データ $d'_k = R_1 (= R_2)$ で決定する. 相違がある場合は復調信号 p_1, p_2 の絶対値が大きい判定結果 R_1 もしくは R_2 を用いて受信データ d'_k を決定する. 以上の変調・復調方法によりセンシング用光ファイバと参照用光ファイバの長さや屈折率の差によって生じる光伝搬時間差による位相差 θ が変動した場合においても確実に受信データを復調することが可能となる.

図2に周波数ダイバーシティ受信によるビット誤り率改善結果およびダイバーシティ受信例を示す. 図2(a)はセンシング用光ファイバと参照用光ファイバの2本の光ファイバ長に差がある場合のモデルに基づいた周波数ダイバーシティ受信によるビット誤り率(緑)である. 比較のために光ファイバ長に差がない場合のモデルに基づいたビット誤り率(赤)についても示す. 図2(b)は2本の光ファイバ長が変化することにより与えた振動と2倍の振動で復調した結果に相違が出る場合があるが正しく復調できていることが分かる.



(a) センシング用光ファイバと参照用光ファイバの長さに差がある場合(下)と差がない場合(上)のビット誤り率の比較



(b) 与えた振動周波数で復調した結果と2倍の周波数で復調した結果に相違が発生した場合の修正結果例

図2 周波数ダイバーシティ受信によるビット誤り率改善結果およびダイバーシティ受信例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 S. Takahashi, T. Manabe, A. Nakamura, and Y. Koshikiya
2. 発表標題 Vibration Position Estimation Using Bidirectionally Applied Polarizer-based Fiber Optic Sensors System
3. 学会等名 28th International Conference on Optical Fiber Sensors (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 N. Nagamatsu, T. Manabe, A. Nakamura, and Y. Koshikiya
2. 発表標題 Frequency diversity receiver applied to modulated vibration transmission system using Mach-Zehnder interferometer
3. 学会等名 28th International Conference on Optical Fiber Sensors (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋昌平 真鍋 哲也 中村 篤志 古敷谷 優介
2. 発表標題 偏光子を用いた光ファイバ振動センシングのモデル化の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長松希海 真鍋 哲也 中村 篤志 古敷谷 優介
2. 発表標題 変調振動と光ファイバ振動センサを用いた信号伝送におけるDPSK方式の適用
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tetsuya Manabe, Ryoga Hashimoto, Hiroki Fujita, Atsushi Nakamura and Koshikiya Yusuke
2. 発表標題 Low-speed Data Transmission using a Modulated Vibration Signal on an Optical Cable 's Outer Sheath
3. 学会等名 27th International Conference on Optical Fiber Sensors (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 データ伝送システム	発明者 中村 篤志 古敷谷 優介 真鍋 哲也	権利者 日本電信電話株 式会社・国立大 学法人三重大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-171921	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 光ファイバ振動センサを用いたデータ伝送システム	発明者 中村 篤志, 古敷谷 優介, 真鍋 哲也	権利者 三重大学・日本 電信電話株式 会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-002196	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 情報伝送システム、情報伝送方法及び情報送信装置	発明者 中村篤志,古敷谷優 介,脇坂佳史,飯田大 輔,真鍋哲也,本田奈	権利者 日本電信電話株 式会社, 国立大 学法人三重大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-199781	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	中村 篤志 (Nakamura Atsushi)		
研究協力者	古敷谷 優介 (Koshikiya Yusuke)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------