

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：32661

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560479

研究課題名(和文)可変位相フィルタの最適設計と高精度通信路位相補償

研究課題名(英文)Optimal Variable-Phase Filter Design and High-Accuracy Channel-Phase Compensation

研究代表者

伊藤 登 (ITO, Noboru)

東邦大学・理学部・教授

研究者番号：00237041

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：デジタル通信において、通信信号の波形を忠実に伝送するため、デジタル通信路(伝送路)の位相特性が周波数の線形関数でなければならない。このような位相特性は線形位相特性と呼ばれる。もし通信路の位相特性が非線形であれば、伝送信号の波形歪みが生じてしまい、波形の忠実な伝送が不可能となる。本研究では、通信路の非線形位相特性を補償するため、様々な最適化手法を駆使して位相補償回路(位相フィルタ)の最適設計を行った。設計した位相補償回路を通信路に接続し、通信路全体の位相特性をほぼ線形位相にすることにより、通信路全体の位相特性がほぼ線形になり、波形の伝送歪みが最大限に抑えられ、忠実な波形伝送が可能となる。

研究成果の概要(英文)：In digital communications, a nonlinear-phase communication-channel will distort the waveform of a transmitted signal, which is not allowed. To keep the waveform undistorted after signal transmission, it is necessary to compensate the nonlinear-phase by using a digital phase-circuit (phase filter) such that the whole phase response of the compensated communication channel is nearly linear. In this research, various mathematical-programming techniques are utilized to formulate different types of optimal methods for designing an all-pass phase filter so as to approximate a given desired phase accurately. In the variable-phase case, each coefficient of the variable all-pass phase filter is expressed as a polynomial in the phase parameter that tunes the phase response, and then the optimal coefficients of all the polynomials are determined through applying an optimization solver. As a result, the phase response of the designed phase filter can be tuned online for practical applications.

研究分野：信号処理

キーワード：線形位相 非線形位相 位相回路

1. 研究開始当初の背景

デジタル通信において、通信信号の波形を忠実に伝送するため、デジタル通信路(伝送路)の位相特性が周波数の線形関数であることが要求される。このような位相特性は線形位相特性と呼ばれる。デジタル通信路の位相特性が線形位相ならば、伝送信号の波形が歪まず忠実に伝送される。しかし、現実のデジタル通信路は非線形位相特性を有するため、デジタル位相補償回路(デジタル位相フィルタ)を通信路に接続し、通信路全体の位相特性をほぼ線形位相にしなければならない。通信路の全体の位相特性をほぼ線形にすれば波形の伝送歪みが最大限に抑えられ、忠実な波形伝送が可能となる。

これまでの国内・国外の研究をみると、位相特性が固定な(調整不可能な)位相補償回路(固定位相フィルタ)の設計に関する研究はあるが、通信環境(受信場所等)の変化に応じて通信路の位相特性の変化に素早く対応できる可変位相補償フィルタ(可変位相フィルタ)の最適設計に関する研究は見当たらなかった。従来の位相補償回路を応用する場合、通信路の位相特性が変わる度に位相補償フィルタの再設計が必要となるため、瞬時的な位相補償を実現することが極めて困難である。

2. 研究の目的

本研究では、可変位相デジタルフィルタ(可変位相フィルタ)という新しい概念を導入し、伝送路の位相特性の瞬時的な変化に素早く対応できる可変位相補償フィルタの最適設計を行い、素早い位相補償を実現する。つまり、本研究の目的は位相が可変なデジタルフィルタ(可変位相フィルタ)の最適設計法を開発し、可変位相フィルタ(variable-phase filter: VP filter)を通信路に接続して、非線形位相特性に対する位相補償を行い、波形の伝送歪みを完全に無くす、又は最大限に抑えることを目指すことである。本研究では、可変位相フィルタ(VP filter)の最適設計に関する研究は見当たらないという現状を踏まえ、可変位相フィルタの最適設計法を開発し、設計した可変位相フィルタを通信路の位相補償に応用し、通信路の非線形位相特性を瞬時に補償できることを目指す。

3. 研究の方法

可変位相フィルタの数学モデルとしては、非再帰形のものと同再帰形のものがあるが、本研究では、再帰形モデルの中に振幅特性がすべての周波数において常に1である全域通過(all-pass)形の数学モデルを用いる。与えられた可変位相補償特性(可変位相仕様)に対して、全域通過・可変位相フィルタのmin-max設計を行い、全域通過・可変位相フィルタの最適な数学モデルを見つける。ここ

でmin-max設計とは全域通過・可変位相フィルタの周波数応答誤差の最大値(max)、又は位相誤差の最大値(max)を何らかの最適化法で最小化する(minimize)ということである。

本研究の導入段階として、まず全域通過・固定位相フィルタの設計に関する準備(誤差関数の導出と設計問題の定式化等)を行ってから正式に全域通過・可変位相フィルタの最適設計を行う。全域通過・可変位相フィルタの設計に際しても周波数応答の誤差関数と位相誤差関数の導出及びこれらの誤差関数に基づく最適設計の定式化が必要となる。以上の2段階を踏まえて以下の幾つかのステップに沿って研究を進めていた。

- (1) 全域通過・固定位相フィルタの安定条件を検討し、安定性を保証するための措置と安定性の検証方法を定める。
- (2) 全域通過・固定位相フィルタの周波数誤差応答誤差関数の導出と位相誤差関数の導出
- (3) 周波数応答誤差関数と位相誤差関数の等価性の検討。結局、周波数応答誤差関数と位相誤差関数に基づく設計は等価であることを明らかにした。
- (4) 線形計画法による最適設計アルゴリズムの定式化と計算機シミュレーションによる設計精度の検証
- (5) 2次錐計画法による最適設計アルゴリズムの定式化と計算機シミュレーションによる設計精度の検証
- (6) 回転錐計画法による最適設計アルゴリズムの定式化と計算機シミュレーションによる設計精度の検証
- (7) L_p ノルムに基づく重みつき最小自乗法に基づく最適設計アルゴリズムの収束性の検討及び収束保証法の開発。最後に、計算機シミュレーションによる収束性の確認と設計精度の検証
- (8) 全域通過・可変位相フィルタの係数を可変にするため、全域通過・可変位相フィルタの各係数を位相パラメータの異なる多項式として仮定し、最適化手法で多項式の最適係数を見つける。結局、各係数

を表す多項式に位相パラメータの異なる値を代入すれば異なる係数を得ることができ、位相特性を可変にすることが可能となる。実際の応用に際して、与えられた理想の位相仕様に応じて素早く所望の位相特性を得ることができる。

4. 研究成果

上記の各研究ステップに従って研究を進め、以下の研究成果を得ることができた。

- (1) 全域通過位相回路の周波数応答の誤差関数は分母が存在し、更にその分母自身も回路網の未知係数の関数となっているため、そのままでは設計問題を2次錐計画問題に帰着させることができない。この問題を解決するため、本研究では、2次錐計画法による非繰り返し設計法を提案し、数値例を用いて従来の線形計画法と比較し、非繰り返し2次錐計画設計法の有効性を確認した。しかし、この非繰り返し2次錐計画設計では、誤差関数の分母を無視することと等価であるため、設計に用いた誤差関数は実際の誤差関数の近似である。
- (2) 上記の非繰り返し2次錐計画設計の精度を高めるため、誤差関数の分母を無視しないように様々な分母の近似法を開発し、未知な分母を既知のものとして近似した後、その近似した分母を用いて全域通過位相フィルタの設計問題を繰り返し2次錐計画法で解く。計算機シミュレーションを通して繰り返し2次錐計画法による設計は非繰り返し2次錐計画による設計より精度が高いことが確認できた。
- (3) 設計に要する計算量と設計問題の定式化を単純化するため、線形計画法による様々な定式化を行った。前の非繰り返し2次錐計画設計と繰り返し2次錐計画設計と同様に、全域通過位相フィルタの周波数応答誤差関数の分母が未知であるため、そのままでは線形計画法でmin-max設計問題を解くことができない。本研究では、誤差関数の分母を無視し、最適設計問題を非繰り返し線形計画設計問題に帰着させる設計法を提案した。更に、誤差関数の分母を無視しない様々な異なる形の繰り返し線形計画設計法も開発し、設計精度を高めることを目指した。計算機シミュレーションを通じて線形計画法に基づく様々な設計法の精度比較を行い、繰り返し線形計画設計法による設計精度が高いことを確認すること

ができた。

- (4) 既存のLpノルムに基づく重みつき最小自乗法は柔軟性があるものの、その収束性は保証されていない。ノルムp(整数)を変えれば様々なノルムに基づく設計が可能という柔軟性をもっている反面、繰り返しの過程でアルゴリズムが発散してしまうことがある。本研究では、この発散問題を解決するため、設計アルゴリズムが着実に収束するような解決法を見つけて、収束した設計を実現した。計算機シミュレーションを用いて提案した収束法の有効性を確認した。また、収束した設計の精度を数値例で実証した。
- (5) 全域通過・可変位相フィルタの係数を位相パラメータの異なる多項式としてモデル化し、線形計画法を用いて多項式の最適係数を見つける設計アルゴリズムを開発した。計算機シミュレーションを用いて提案した線形計画法に基づく可変位相フィルタの有効性を実証した。結局、設計した全域通過・可変位相フィルタの係数は位相パラメータの関数となっているため、瞬時に所望の位相特性を得ることができ、本研究の最終目的を達成することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① T.-B. Deng,
“Variable-phase filter design using linear-programming technique,” International Journal of Electronics Letters (掲載決定) 査読有
DOI: 10.1080/21681724.2015.1036797
- ② T.-B. Deng and W. Qin,
“Improved bi-equiripple variable fractional delay filters,” Signal Processing, vol. 94, no. 1, pp. 300-307, Jan. 2014. 査読有
DOI: 10.1016/j.sigpro.2013.07.004
- ③ T.-B. Deng and W. Qin,
“Coefficient relation-based minimax design and low-complexity structure of variable fractional-delay digital filters,” Signal Processing, vol. 93, no. 4, pp. 923-932, Apr. 2013. 査読有
DOI: 10.1016/j.sigpro.2012.11.004

④ T.-B. Deng, S. Chivapreecha, and K. Dejhan, “Bi-minimax design of even-order variable fractional-delay FIR digital filters,” IEEE Trans. Circuits Syst. I: Regular Papers, vol. 59, no. 8, pp. 1766-1774, Aug. 2012. 査読有
DOI: 10.1109/TCSI.2011.2180431

[学会発表] (計 10 件)

① N. Ito,
“High accuracy phase equalizer for communication channel compensation,” Proc. 2015 Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems, (ACIIDS 2015), pp. 529-539, Bali, Indonesia, Mar. 25, 2015.

② N. Ito,
“Phase-correction-system (PCS) design utilizing successively linearized optimization,” Proc. 2014 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA 2014), paperID_1003, Siem Reap, Cambodia, Dec.12, 2014.

③ W. Qin and N. Ito,
“Improved accuracy of phase-system design utilizing second order cone programming,” Proc. 2014 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC 2014), pp. 28-31, Guilin, China, Aug. 7, 2014.

④ W. Qin and N. Ito,
“Phase equalization system (PES) design utilizing new phase-error function,” Proc. 2014 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2014), pp. 1026-1029, Istanbul, Turkey, June 2, 2014.

⑤ N. Ito,
“Phase-correction-network design using the SOCP optimization scheme,” Proc. 2014 IEEE (ninth) International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (IEEE ISSNIP 2014), pp. 1-4, Singapore, Apr. 24, 2014.

⑥ W. Qin and N. Ito,
“Lp-norm-based all-pass system design with improved convergence and robustness,” Proc. 2013 (13th) IEEE International Conference on Control, Automation and Systems (IEEE ICCAS 2013), pp. 1825-1829, Gwangju, Korea, Oct. 23, 2013.

⑦ N. Ito and T.-L. Deng,
“Second order cone programming scheme for designing all-pass phase systems,” Proc. 2013 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC 2013), pp. 1-5, Kunming, China, Aug. 7, 2013.

⑧ N. Ito and W. Qin,
“Rotated-cone-programming method for designing phase-equalization system,” Proc. 2013 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (IEEE SSCI 2013), pp. 1-4, Singapore, Apr. 19, 2013.

⑨ T.-B. Deng,
“Simplified linear programming method for designing all-pass phase-compensation network,” Proc. the first IEEE International Conference on Control, Automation and Information Sciences (IEEE ICCAIS 2012), pp. 148-151, Ho Chi Minh City, Vietnam, Nov. 26, 2012

⑩ T.-B. Deng,
“All-pass digital system design using second-order cone programming,” Proc. 2012 IEEE Conference on Open Systems (IEEE ICOS 2012), pp. 1-4, Kuala Lumpur, Malaysia, Oct. 22, 2012.

[その他]

<http://www.lab.toho-u.ac.jp/sci/is/deng>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 登 (ITO, Noboru)
(T.-B. Deng)
東邦大学・理学部・教授

研究者番号 : 00237041

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし