

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月7日現在

機関番号：32661

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06368

研究課題名(和文)可変位相補償器の大域的最適設計と高安定性保証

研究課題名(英文)Globally Optimal Variable-Phase Compensator With Robust Stability

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：非線形位相通信システムは伝送後の信号波形を変形させてしまい、元の信号がもつ波形情報が失われてしまう。この波形歪問題を解決するため、本研究では、全域通過型位相補償器を設計し、それを非線形位相システムに接続して位相補償を行い、波形歪を回避する。研究の第一ステップとして、まず位相補償器の様々な誤差関数を導出し、これらの誤差関数に基づき、線形計画法、2次錘計画法、回転2次錘計画法、非線形数理計画法などの最適化法を駆使して、固定位相補償器と可変位相補償器の様々な設計法を開発した。また、一般化安定三角形を導出し、それを一定の安定余裕を有する2次位相補償器の設計へ応用し、その有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

デジタル信号処理システムとデジタル通信システムは線形位相システムと非線形位相システムに分類できる。信号波形を維持したまま信号処理と信号伝送を行うため、線形位相が要求される。もし位相特性が非線形であれば、信号処理後、又は信号伝送後の信号波形が歪んでしまい、元の信号波形のもつ情報が失われてしまう。このような波形歪問題を解決するため、本研究では、様々な数理計画法を駆使した位相補償器の設計法を開発し、設計した固定位相補償器と可変位相補償器を元の非線形位相システムに接続することにより位相補償を行い、システム全体の位相特性を線形化することで波形歪を回避ができ、高品質波形伝送が可能となる。

研究成果の概要(英文)：A non-linear phase communication channel cannot preserve the original waveform of a transmitted signal and thus causes waveform distortions. To solve this waveform distortion problem, various design methods are developed for designing both fixed-phase and variable-phase compensators. After deriving the cost functions (both phase-error functions and frequency-response error functions), we minimize the cost functions by employing various mathematical programming methods, including linear programming, second-order cone programming, and non-linear mathematical programming. Cascading the designed phase compensators to the original non-linear phase communication channel produces an overall system with approximately linear phase. This overall system is able to preserve the original signal waveform. Moreover, a novel method is developed for deriving the generalized stability triangle that is applied to the design of the second-order phase compensator with a prescribed stability margin.

研究分野：信号処理

キーワード：線形位相 非線形位相 位相補償器

1. 研究開始当初の背景

デジタルシステムは線形位相システムと非線形位相システムに大別される。線形位相システムとはシステムの位相特性が周波数の線形関数であるシステムのことである。デジタル信号処理とデジタル通信において、信号処理後の信号波形、または信号伝送後の信号波形を保つため、デジタルシステムの位相特性は周波数の線形関数（位相特性）であることが要求される。もし非線形位相であれば、信号処理後または信号伝送後の信号波形が変形され、元々の信号波形がもつ重要な情報が失われてしまう。デジタル通信における波形伝送においては、通信信号の波形が忠実に伝送されなければならない。この場合、デジタル通信路（communication channel）の位相特性が線形でなければならない。しかし、実際のデジタル通信路は非線形位相特性を有するため、通信信号の波形歪が生じてしまい、信号波形が歪んでしまう。このような波形歪問題を解決するため、デジタル位相補償器を設計し、元の非線形通信路に接続して、非線形位相特性を補償することにより、通信路全体の位相特性をほぼ線形にすることが可能となり、波形歪問題を解決できる。更に、通信路の位相特性が通信環境によって変化する場合、位相補償器の位相特性もそれに応じて変化しなければならない。つまり、位相補償器の位相特性が可変であることが要求される。従って、可変位相補償器の最適設計法の確立が必要であり、これは位相特性が不変な固定位相補償器の設計より一段と難しくなる。これまでの国内・国外の研究をみると、位相特性が不変な固定位相補償器の設計に関する研究はあるが、通信路の変化に対応できる可変位相補償器の最適設計法に関する研究は少なく、可変位相補償器の新しい最適設計法の確立が要求される。

2. 研究の目的

実際のデジタル通信路は非線形位相特性を有するため、通信信号の波形歪が生じ、元の伝送信号がもつ波形情報が失われてしまい、波形伝送の品質が著しく劣化する。このような非線形位相特性による波形歪問題を解決するため、位相補償器を設計し、元の非線形位相伝送路に接続して位相補償を通じて全体の位相特性をほぼ線形にすることにより、波形歪問題を解消することができる。更に、通信環境が変化すると、通信路の位相特性も変化する。このような環境変化に素早く対応できる位相補償器（可変位相補償器）の最適設計法の確立が要求される。本研究の目的は様々な数値計画法を駆使し、可変位相補償器の最適設計法を開発し、可変位相補償器による可変位相補償を実現することである。また、本研究で開発する全域通過型位相補償器は帰還回路を有するため、不安定になる恐れがあるため、位相補償器の安定性保証も考慮する必要がある。更に、位相補償器の安定性を保証する上で、位相補償器の安定性に一定の余裕を持たせることも本研究のもう一つの目的である。要するに、一定の安定余裕を有する位相補償器の最適設計法の開発が本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究で開発する位相補償器の数学モデルは全域通過型伝達関数である。この数学モデルの特徴として、振幅特性はすべての周波数において常に1であるが、位相特性は伝達関数の係数の非線形関数である。位相補償器の最適設計とは与えられた位相特性（固定位相特性と可変位相特性）に最も近い位相補償器の数学モデル（伝達関数）の最適係数を見つけることである。つまり、本研究の目的は位相誤差の最大誤差を最小化し、伝達関数の係数を最適化することである。研究の方法としては、まず全域通過型固定位相補償器の様々な最適設計法を新しく開発し、これらの新しい設計法により設計された固定位相補償器を用いて位相補償の有効性を実証する。固定位相補償器の最適設計法の開発を出発点とする理由は固定位相補償器の設計法の開発と固定位相補償は固定位相補償器の最適設計法の開発と可変位相補償の基本であるからである。固定位相補償器の設計法を開発できたら、次のステップとしては可変位相補償器の最適設計法開発への拡張である。この場合、伝達関数の係数は定数ではなく、位相特性を可変にする位相パラメータの関数（多項式関数）である。結局、可変位相補償器の最適設計においては、如何に最適多項式関数を見つけるかが重要である。固定位相補償器の最適係数（定数）と可変位相補償器の最適可変係数（最適多項式関数）を見つけるため、様々な数値計画法の適用が不可欠となり、如何に位相補償器の最適設計問題を定式化し、位相補償器の最適設計問題を数値計画問題に帰着させるかが設計の中心となる。本研究では、以下のステップを踏まえて研究を進めてきた。

- (1) 全域通過型位相補償器の最適設計法を開発するため、まずコスト関数（誤差関数）の導出が必要となる。本研究では、従来の既存の様々な位相誤差関数に加え、幾つかの新しい誤差関数の導出。また、既存の誤差関数に対する新しい導出法の開発。更に、これらの誤差関数の等価性についての理論的な証明。

- (2) 分子と分母の両方が複素関数である周波数応答誤差関数の最小化に際して、2 次錐計画法による非繰り返し最適化手法の開発。この設計の定式化においては、従来のものと異なる複素行列と複素ベクトルの使用と簡略化。
- (3) 分子と分母の両方が複素関数である周波数応答誤差関数の最小化に際して、2 次錐計画法による繰り返し最適化手法の開発と 2 次錐計画法による設計結果の更なる非線形最適化(2 段式最適化手法の開発)。
- (4) 分子と分母の両方が複素関数である周波数応答誤差関数の最小化に際して、2 次錐計画問題の実行可能性検証 (check) による設計法の開発。
- (5) 分子と分母の両方が実関数である双線形誤差関数の最小化に際して、非線形制約条件の線形化による線形計画設計法の開発。
- (6) 分子と分母の両方が実関数である双線形誤差関数の最小化に際して、線形分数計画法による設計法の開発。
- (7) 一般化安定三角形の新しい導出法の開発とこの一般化安定三角形の 2 次位相補償器の設計への応用。
- (8) 分子と分母の両方が実関数である双線形誤差関数の可変位相補償器の設計への拡張と繰り返し線形計画法による可変位相補償器の最適設計法の開発。

4. 研究成果

上記の研究計画と手法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) 全域通過型位相補償器の最適設計法を開発するため、まずコスト関数 (誤差関数) の導出が必要となる。本研究では、従来の既存の様々な位相誤差関数に加え、幾つかの新しい誤差関数を導出した。また、既存の誤差関数に対して、新しい導出法を開発し、異なる方法で同じ形の誤差関数を導出することができることを示した。更に、これらの誤差関数の等価性についても理論的に証明した。
- (2) 分子と分母の両方が複素関数である周波数応答誤差関数の最小化に際して、2 次錐計画法による非繰り返し最適化手法を開発し、固定位相補償器の最適設計を行って位相補償の具体例を用いて設計した位相補償器の有効性を確認した。この設計の定式化においては、従来のものと異なり、複素行列と複素ベクトルが使用され、定式化が簡略化されるという特徴をもっている。
- (3) 分子と分母の両方が複素関数である周波数応答誤差関数の最小化に際して、2 次錐計画法による繰り返し最適化手法を開発し、2 次錐計画法による設計結果を更に非線形数理計画法を駆使して最適化する 2 段式最適化手法を開発した。この 2 段式最適化手法に基づいて設計された固定位相補償器を位相補償に応用した。
- (4) 分子と分母の両方が複素関数である周波数応答誤差関数の最小化に際して、2 次錐計画問題の実行可能性検証 (check) による設計法を開発し、高精度で位相補償器を設計できるのを実証した。
- (5) 分子と分母の両方が実関数である双線形誤差関数の最小化に際して、非線形制約条件の線形化による線形計画設計法を開発した。非線形制約条件の様々な線形化法を開発し、設計した位相補償器を位相補償に応用し、これらの設計手法の有効性を確かめた。
- (6) 分子と分母の両方が実関数である双線形誤差関数の最小化に際して、線形分数計画法による設計法を開発した。この線形分数計画法に基づく設計法は従来の線形分数計画法を一般化したものである。
- (7) 一般化安定三角形の新しい導出法を開発し、この一般化安定三角形を 2 次位相補償器の設計に応用し、一定の安定余裕を有する 2 次位相補償器の設計法 (非線形計画法) を開発した。
- (8) 分子と分母の両方が実関数である双線形誤差関数を可変位相補償器の設計に拡張し、繰り返し線形計画法による可変位相補償器の最適設計法を開発し、可変位相補償の具体例を用いてその有効性を実証した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① T.-B. Deng, “Biquadratic digital phase-compensator design with stability-margin controllability,” *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, vol. 28, no. 4, pp. 1950068_1-15, Apr. 2019. 査読有
DOI: 10.1142/S0218126619500683
- ② T.-B. Deng, “Convergent method for designing high-accuracy bi-equiripple variable-delay filters using new delay-error expression,” *Multidimensional Systems and Signal Processing*, vol. 30, no. 1, pp. 343-361, Jan. 2019. 査読有
DOI: 10.1007/s11045-018-0559-3
- ③ P. Soontornwong, T.-B. Deng, S. Chivapreecha, “Low-complexity and high-modularity structure for implementing transient-free Pascal-delay filter,” *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 65, no. 23, pp. 6233-6243, Dec. 2017. 査読有
DOI: 10.1109/TSP.2017.2750117
- ④ T.-B. Deng, “High-accuracy variable-phase filter design utilizing iterative linear-programming strategy,” *International Journal of Electronics*, vol. 104, no. 10, pp. 1658-1674, Oct. 2017. 査読有
DOI: 10.1080/00207217.2017.1321143
- ⑤ T.-B. Deng, “Coefficient-relation development and low-complexity odd-order variable-fractional-delay filter design,” *Journal of The Franklin Institute*, vol. 354, no. 2, pp. 1195-1208, Jan. 2017. 査読有
DOI: 10.1016/j.jfranklin.2016.11.031
- ⑥ T.-B. Deng, “Generalized stability-triangle for guaranteeing the stability-margin of the second-order digital filter,” *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, vol. 25, no. 8, pp. 1650094_1-13, Aug. 2016. 査読有
DOI: 10.1142/S0218126616500948

[学会発表] (計 10 件)

- ① T.-B. Deng, “Biquadratic phase-compensating system with robust stability,” *Proc. 2019 International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (IMECS 2019)*, pp. 176-179, Hong Kong, Mar. 13-15, 2019.
- ② T.-B. Deng, “Generalized linear-fractional programming (LFP) for designing phase-compensation system,” *Proc. 2019 IEEE International Electrical Engineering Congress (IEEE iEECON 2019)*, pp. 1-4, Cha-Am, Phetchaburi, Thailand, Mar. 6-8, 2019.
- ③ T.-B. Deng, “Novel constraint-linearization methodology for designing high-accuracy phase equalizer,” *Proc. 2018 IEEE Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (IEEE TIMES-iCON 2018)*, pp. 1-4, Bangkok, Thailand, Dec. 12-14, 2018.
- ④ T.-B. Deng, “Closed stability-margined regions for the second-order system with robust stability,” *Proc. 2018 IEEE Region 10 Conference (IEEE TENCON 2018)*, pp. 536-539, Jeju, Korea, Oct. 28-31, 2018.
- ⑤ T.-B. Deng, “High-accuracy phase-compensating system design using successively linearized constraints,” *Proc. 2018 IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies (IEEE ISCIT 2018)*, pp. 1-4, Bangkok, Thailand, Sept. 26-29, 2018.
- ⑥ T.-B. Deng, “Phase-compensator design via checking complex-constrained Qcone feasibility,” *Proc. IEEE ECTI-NCON 2018*, pp. 1-4, Chiang Rai, Thailand, Feb. 25-28, 2018.

- ⑦ T.-B. Deng, “Enhanced-accuracy phase-equalizer using conic-plus-nonlinear optimizations,” Proc. 2017 IEEE International Conference on Computer, Information, and Telecommunication Systems (IEEE CITS 2017), pp. 50-53, Dalian, China, July 21-23, 2017.
- ⑧ T.-B. Deng, “Phase-compensator design using two-step mathematical programming,” Proc. IEEE TENCON 2016, pp. 1150-1153, Marina Bay Sands, Singapore, Nov. 22-25, 2016.
- ⑨ T.-B. Deng, “Error-derivation and error-equivalence for phase-equalizer design,” Proc. 2016 IEEE International Conference on Intelligent & Advanced Systems (IEEE ICIAS2016), pp. 1-4, Kuala Lumpur, Malaysia, Aug. 15-17, 2016.
- ⑩ T.-B. Deng, “Phase-compensator design using convex-programming scheme,” Proc. 2016 IEEE World Congress on Intelligent Control and Automation (IEEE WCICA 2016), pp. 1420-1423, Guilin, China, June 12-15, 2016.

[その他]

<http://www.lab2.toho-u.ac.jp/sci/is/deng/index.html>

6. 研究組織

- (1) 研究分担者
該当者なし
- (2) 研究協力者
該当者なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。