

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 11 日現在

機関番号：32661

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04379

研究課題名（和文）高次・高安定・可変位相補償器の最適設計と高品質通信の実現

研究課題名（英文）Designing High-Order Stable Variable-Phase Compensator for High-Quality Communications

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：非線形位相特性をもつデジタル通信路は伝送信号の波形を変形させ、通信品質の劣化を招く。本研究では、伝送信号の波形歪を回避するため、全域通過型位相補償器を設計し、設計した位相補償器を通信路に接続し、通信路の非線形位相補償を施して伝送信号の波形歪を回避する。本研究の第1段階では、まず全域通過型位相補償器の設計に不可欠な位相誤差関数と周波数応答誤差関数を導出した。次に、導出した誤差関数を最小化するため、様々な最小化手法を開発し、誤差関数の最小化を行い、位相補償器の最適設計を行った。また、位相補償器の安定性を強化するため、一般化安定三角形の安定条件を適用し、高安定な縦続型位相補償器の最適設計を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

通信システムと信号処理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されるが、非線形位相システムは信号波形を変形させ、信号処理後または信号伝送後の信号波形を変形させてしまう。このような波形歪問題は波形保持が重要な応用では避けなければならない。本研究では、波形歪問題を解決するため、全域通過型位相補償器というデジタルシステムの最適設計を行い、得られた位相補償器を非線形位相システムに接続し、システム全体の位相特性をほぼ線形位相に補償することにより、信号の波形歪問題を解決し、高品質波形伝送を実現した。

研究成果の概要（英文）：The communication channel with nonlinear-phase characteristic distorts the original waveform of the transmitted signal after the signal passes through the nonlinear-phase channel. To prevent such waveform distortions, it is mandatory to design a phase compensator and then cascade it to the original communication channel such that the entire channel has nearly linear phase. The first stage of this study derived the phase error and frequency-response error of a recursive all-pass phase compensator, and the second stage developed several programming techniques for minimizing those errors. That is, the major contributions of this study are the developments of various minimization techniques employing a wide variety of programming algorithms, and those minimization techniques are then employed to get an optimal all-pass phase compensator. Furthermore, the robustness of the cascade phase compensator's stability has also been enhanced via more general stability-triangle conditions.

研究分野：信号処理

キーワード：通信システム 位相特性 線形位相 非線形位相 位相補償

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 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分類できる。もしシステムの位相特性は周波数の非線形関数であれば、このようなシステムは非線形位相システムと呼ばれる。デジタル通信において、非線形位相特性は伝送信号の波形歪を起こしてしまい、通信の品質劣化を招く。従って、非線形位相補償することが重要である。非線形位相システムによる波形歪を避けるため、デジタル位相補償器を設計し、元の非線形位相システム(通信路)に縦続接続することにより、通信路全体の位相特性を近似的に補償することで信号の波形歪問題を解決できる。更に、移動通信においては、通信路の位相特性は刻々と変化するため、位相補償器の位相特性もそれに応じて変わらなければならない。つまり、位相補償器の位相特性を可変にする必要があるため、可変位相補償器の最適設計も必要となる。しかし、可変位相補償器の設計は固定位相補償器の場合と比べ、一段と難しくなる。国内外の研究をみると、位相特性が可変な位相補償器の設計に関する研究は少ない。よって、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の開発が不可欠である。

### 2. 研究の目的

デジタル通信路の非線形位相特性を補償し、通信路全体の位相特性をほぼ線形位相に直すことにより、通信信号の波形歪問題を回避でき、高品質のデジタル通信が可能となる。本研究の目的はこのような高品質通信を可能にする再帰形全域通過位相補償器の最適設計法を開発することである。しかし、この設計問題は非線形最適化問題となり、極めて難しい。本研究では、再帰形全域通過位相補償器の様々な誤差関数(位相誤差関数と周波数応答誤差関数)を導出し、これらの誤差関数の最小化を行って、再帰形全域通過位相補償器を設計する。誤差の最小化を行うため、様々な数理計画法を駆使し、最小化アルゴリズムを開発する。更に、再帰形全域通過位相補償器の安定性を強化するため、一般化安定三角形の安定条件を適用し、安定性に一定の余裕を持たせる最適化手法を開発する。これらの最適化手法によって得られた再帰形全域通過位相補償器を元の非線形位相通信路に縦続接続し、非線形位相の補償を行い、通信路の全体位相をほぼ線形位相に直し、通信信号の波形歪を回避することができ、高品質通信を実現する。

### 3. 研究の方法

再帰形全域通過位相補償器の位相特性は与えられた位相設計仕様に近づく必要がある。つまり、本研究の目的は再帰形全域通過位相補償器の最適数学モデルを見つけ、位相補償器の実際の位相応答を理想の位相応答に近づけることである。この目的を実現するため、再帰形全域通過システムの位相誤差関数と周波数応答誤差関数を導出し、これらの誤差関数を最小化する必要がある。本研究の第1段階では、まず様々な誤差関数を導出した。次に、これらの誤差関数を最小化するため、様々な最小化手法を開発した。これらの最小化手法は様々な数理計画法を適用し、より良い近似結果を目指したものである。また、再帰形全域通過位相補償器の安定性を保証するため、変数変換法と様々な変換関数を開発した。具体的には、

- (1) 全域通過位相補償器の位相誤差を線形有理関数に近似し、繰り返し線形計画設計法の開発。
- (2) 全域通過位相補償器の位相誤差を線形有理関数に近似し、非線形制約の線形化に基づく線形計画設計法の開発。
- (3) 全域通過位相補償器の位相誤差を線形有理関数に近似し、線形計画と非線形計画の併用によるハイブリッド最適化手法(2段階最適化手法)の開発。
- (4) 全域通過位相補償器の周波数応答誤差関数を導出し、2次錐計画法による非繰り返し最適化手法の開発。
- (5) 全域通過位相補償器の安定性を保証するため、分母の係数変換に必要な変換関数の開発。
- (6) 全域通過位相補償器の安定性を強化するため、一般化安定三角形による最適設計法の開発。

#### 4 . 研究成果

上記の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位相誤差を線形有理関数に近似し、この線形有理関数を最小化するため、繰り返し線形計画設計法を開発し、設計例を用いてその有効性を確認した。
- (2) 全域通過型位相補償器の位相誤差を線形有理関数に近似し、非線形制約の様々な線形化アルゴリズムを開発し、これらの線形化アルゴリズムに基づく線形計画設計法を開発した。
- (3) 全域通過型位相補償器の位相誤差を線形有理関数に近似し、まず線形計画手法を適用し、次にその結果を出発点として非線形最小化を行う2段階最適化手法を開発した。
- (4) 全域通過型位相補償器の周波数応答誤差関数を導出し、周波数応答誤差の最小化問題を非繰り返し2次錐計画法に帰着させる最適化手法を開発した。
- (5) 全域通過型位相補償器の安定性を保証するため、全域通過型位相補償器の分母係数に対する係数変換が必要となる。係数変換を行うための様々な変換関数を開発した。
- (6) 全域通過型位相補償器の安定性を強化するため、一般化安定三角形の安定条件を適用し、縦続接続・全域通過型位相補償器の最適設計法を開発した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 T.-B. Deng	4. 巻 18
2. 論文標題 Cascade-form odd-order stability-guaranteed tunable-bandwidth digital filter	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Signal, Image and Video Processing	6. 最初と最後の頁 2773-2781
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11760-023-02948-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Deng Tian-Bo	4. 巻 8
2. 論文標題 Stability-guaranteed odd-order variable-bandwidth filters using stabilized odd-order transfer function	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Information and Telecommunication	6. 最初と最後の頁 1~15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/24751839.2024.2303880	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 T.-B. Deng	4. 巻 8
2. 論文標題 Variable-bandwidth recursive-filter design employing cascaded stability-guaranteed 2nd-order sections using coefficient transformations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Information and Telecommunication	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/24751839.2023.2267890	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 T.-B. Deng	4. 巻 477
2. 論文標題 Unity-Bounded Function and Benchmark Design Specifications Targeted for Designing Typical Variable Digital Filters	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering	6. 最初と最後の頁 107~120
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-031-29126-5_9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T.-B. Deng	4. 巻 32
2. 論文標題 Various Unity-Bounded Functions for Designing Recursive Digital Filters with Variable Notch-Frequency and Guaranteed Stability	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Circuits, Systems and Computers	6. 最初と最後の頁 2350095_1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218126623500950	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T.-B. Deng	4. 巻 Special Issue
2. 論文標題 Biquadratic Allpass Phase-Compensating System Design Utilizing Bilinear Error	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IAENG Transactions on Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 33-47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/9789811215094_0003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Deng Tian-Bo	4. 巻 9
2. 論文標題 Phase-compensating-system design using generalised stability-triangle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Electronics Letters	6. 最初と最後の頁 88 ~ 104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21681724.2019.1692238	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 T.-B. Deng
2. 発表標題 The necessity and strategy for stability-constrained recursive variable digital filters
3. 学会等名 IEEE ICBIR 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T.-B. Deng
2. 発表標題 Guaranteeing variable-filter stability utilizing inverse trigonometric functions
3. 学会等名 IEEE NBEC 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T.-B. Deng
2. 発表標題 Parameter-conversion functions for ensuring variable-digital-filter stability
3. 学会等名 IEEE AGRETA 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T.-B. Deng
2. 発表標題 Variable bandpass filters with full-band tunability and absolutely guaranteed stability
3. 学会等名 IEEE TENCON 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T.-B. Deng
2. 発表標題 Phase-equalizing filter design employing quadratic-cone programming
3. 学会等名 IEEE MICC 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T.-B. Deng
2. 発表標題 Phase-compensating-circuit design utilizing linear-nonlinear joint optimizations
3. 学会等名 IEEE IC0IN 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T.-B. Deng
2. 発表標題 Unique functions for the stability-guarantee of variable digital filters
3. 学会等名 IEEE ICAIIC 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T.-B. Deng
2. 発表標題 Parameter-replacement functions for stability-guaranteed variable digital filters
3. 学会等名 IEEE CSPA 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T.-B. Deng
2. 発表標題 Scaling-free transformations for stability-guaranteed variable notch-frequency filters
3. 学会等名 IEEE ICPEA 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T.-B. Deng
2. 発表標題 New linearization for iterative phase-filter design
3. 学会等名 IEEE ECTI-DAMT-NCON 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T.-B. Deng
2. 発表標題 Phase-circuit design using a single equality-constrained linear-fractional programming
3. 学会等名 ITC-CSCC 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.-B. Deng
2. 発表標題 Generalized stability triangle and robust phase compensator design
3. 学会等名 IEEE ICSIPA 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.-B. Deng
2. 発表標題 Unconstrained minimax design of cascade-form allpass phase system
3. 学会等名 IEEE CISP-BMEI 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 T.-B. Deng
2. 発表標題 Derivations and relations of various cost functions for allpass phase-equalizing filter design
3. 学会等名 IEEE APCCAS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------