

サンプル点間応答を考慮した回り込み波キャンセラの H^∞ 最適設計

H^∞ -Optimal Design of Digital Cancellation Filters for Continuous-time Coupling Waves

京都大学大学院情報学研究科 笹原 帆平, 永原 正章, 林 和則, 山本 裕
H. Sasahara, M. Nagahara, K. Hayashi, and Y. Yamamoto
Graduate School of Informatics, Kyoto University

Abstract In this article, we propose H^∞ optimal design of digital filters that cancel the continuous-time effect of coupling waves in a single frequency full-duplex relay station from the transmitter to the receiving antenna. In this study, we model a relay station as a continuous-time system while conventional researches treat it as a discrete-time system. For this model, we design digital filters via the theory of sampled-data H^∞ control for cancellation of coupling waves. Numerical experiments show the effectiveness of the proposed method.

1 はじめに

無線通信システムでは、地理的に搬送波が届きにくい地点と通信を行うために、経路途中で信号の増幅を行う中継局が用いられる。一方、限りある周波数帯域を効率よく利用するために、送受信信号の搬送波周波数として単一の周波数を使用する単一周波数ネットワークが注目されている [2]。このような単一周波数ネットワークにおいて全二重の中継局を用いる場合、中継局自身の送信信号が同じ中継局の受信部に回りこんで発振してしまうという問題がある [5]。

この問題の解決法として、デジタル信号処理により回り込み波をキャンセルする手法がこれまでに提案されている [4, 6]。しかし、これらは全てサンプル点上の信号のキャンセルを試みており、連続時間信号としての回り込み波を厳密には考慮していない。ここで、もし対象とする連続時間信号が Nyquist 周波数以下に完全帯域制限されている場合は、原理的には標準化定理によりサンプル点間の応答も復元し得る [7]。しかし実際にはベースバンド信号の性質やパルス整形フィルタの特性、回路の非線形性などの影響から、完全帯域制限の仮定はほとんどの場合、厳密には満たされない。よって、特に高周波数成分を多く含むような信号に対して従来手法による回り込み波キャンセラを用いた場合、期待される性能は達成できない。

以上の問題に対処するため、本稿ではサンプル値制御理論 [1] を用いてサンプル点間応答を陽に考慮したデジタル回り込み波キャンセラの設計法を提案する。すなわち、回り込み経路特性と回り込み波キャンセラを含む信号処理系との誤差系の H^∞ ノルムを最小化するデジタルフィルタを設計する。この問題はサンプル値 H^∞

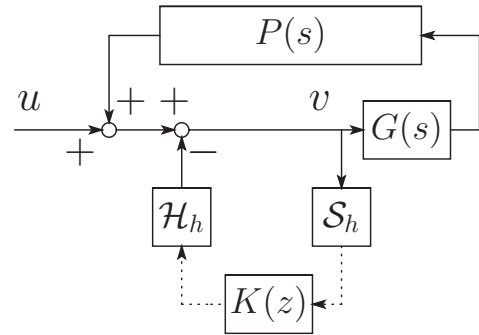


図 1: 中継局における回り込み波とデジタルキャンセラ

最適信号復元問題であり、高速サンプル・ホールド近似の手法を用いて、数値計算により最適フィルタが容易に設計できる [8, 3]。さらに、数値例により、従来法 [6] と比較した提案法の有効性を示す。

2 中継局と回り込み波のモデル

本研究で用いる中継局と回り込み波のモデルを図 1 に示す。ここで、 u は入力ベースバンド信号であり、 v は $G(s)$ でモデル化される増幅器への入力信号である。この中継局における回り込み経路が連続時間の線形時不変系でモデル化されると仮定し、その伝達関数を $P(s)$ とおく。ブロック線図の下部が本研究における回り込み波キャンセラである。ここで、 S_h はサンプリング周期 $h > 0$ の理想サンプリング、 H_h は同じサンプリング周期 h を持つ 0 次ホールドである。また、 $K(z)$ はデジタルフィルタであり、これを設計する。このように、連続時間系と離散時間系が混在するモデルを考える点が従来と大きく異なる点である。

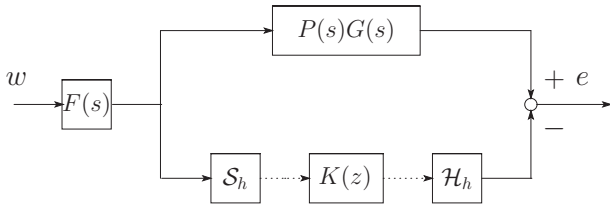


図 2: 誤差系 $\mathcal{E} = (PG - \mathcal{H}_h K S_h)F$

3 デジタルフィルタの H^∞ 最適設計

図 1 のブロック線図より

$$v = u + (PG - \mathcal{H}_h K S_h)v \quad (1)$$

が成り立つ．ここで，信号 v の周波数特性が，安定かつ厳密にプロパーな有理伝達関数 $F(s)$ でモデル化されると仮定する．すなわち，信号 v は $F(s)$ および $w \in L^2$ を用いて $v = Fw$ と表されると仮定する．この仮定より，入力信号として，完全帯域制限されているとは限らない信号を考えていることになる．このような任意の信号 v に対して，誤差 $e := (PG - \mathcal{H}_h K S_h)v$ の L^2 ノルムを一様に最小化することを考える．言い換えると，図 2 に示す誤差系

$$\mathcal{E} := (PG - \mathcal{H}_h K S_h)F$$

の H^∞ ノルム

$$\|\mathcal{E}\|_\infty := \sup_{w \in L^2, w \neq 0} \frac{\|\mathcal{E}w\|_{L^2}}{\|w\|_{L^2}} \quad (2)$$

を最小化するデジタルフィルタ $K(z)$ を設計することを考える．この問題はサンプル値 H^∞ 最適信号復元問題であり，高速サンプル・ホールド近似の手法を用いれば，数値計算により容易に最適フィルタを求めることができる．

H^∞ 最適フィルタにより誤差系 \mathcal{E} の H^∞ ノルムが十分小さいとき，回り込み波の影響 $u - v$ も十分小さくなることを次の定理で示す．

定理 1 誤差系 \mathcal{E} の H^∞ ノルムを $\|\mathcal{E}\|_\infty = \gamma$ とする．このとき， $v = Fw$ ($w \in L^2, \|w\|_{L^2} = 1$) と表される任意の v に対して

$$\|v - u\|_2 \leq \gamma$$

が成り立つ．

証明 式 (1) と H^∞ ノルムの定義 (2) より

$$\begin{aligned} \|v - u\|_2 &= \|(PG - \mathcal{H}_h K S_h)Fw\|_{L^2} \\ &\leq \|\mathcal{E}\|_\infty \|w\|_{L^2} = \gamma. \end{aligned}$$

が成り立つ．

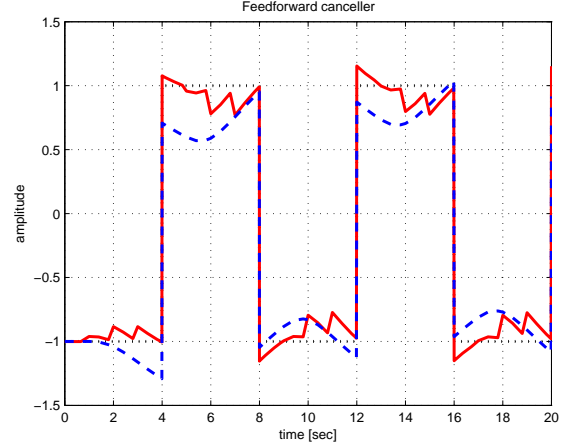


図 3: 復元信号 v : 提案法 (実線)，入力信号 (鎖線)，キャンセラ無しときの信号 v (破線)

4 数値実験結果

提案法の有効性を確かめるため，数値実験を行う．中継局は信号を 5 倍 (約 14dB) に増幅するとし， $G(s) = 5$ とする．回り込み経路特性を，むだ時間を含む伝達関数

$$P(s) = e^{-s} \frac{0.1}{(s+1)^3}$$

とする．サンプリング周期を $h = 1$ に正規化する．アナログ入力信号のモデルとして $F(s) = 1/(2s+1)$ を用いる．デジタルフィルタ設計問題の数値解法として高速サンプル・ホールド近似 [8, 3] を用い，その分割数を $N = 16$ とする．入力信号は周期 $8h = 8$ の周期矩形波とする．この信号には，ナイキスト周波数以上の高周波成分を含む．

以上のもとで，提案法により設計されたデジタルフィルタにより，回り込み波キャンセルのシミュレーションを行う．図 3 に増幅器に入力する前の信号 v の波形を示す．また，図 4 に回り込み波の影響 $|u(t) - v(t)|$ の絶対値のグラフを示す．提案法により，回り込み波がある程度キャンセルされていることがこれらの図よりわかる．

5 おわりに

本研究では，サンプル点間応答を考慮した上で，単一周波数ネットワークでの回り込み波キャンセラの H^∞ 最適設計を行った．シミュレーションにより，高周波数成分を含む入力信号に対する回り込み波キャンセルにおいて，提案法が優れた性能を持つことを示した．また，提案法では，回り込み特性が変化したときにもある程度の性能を有することを示した．

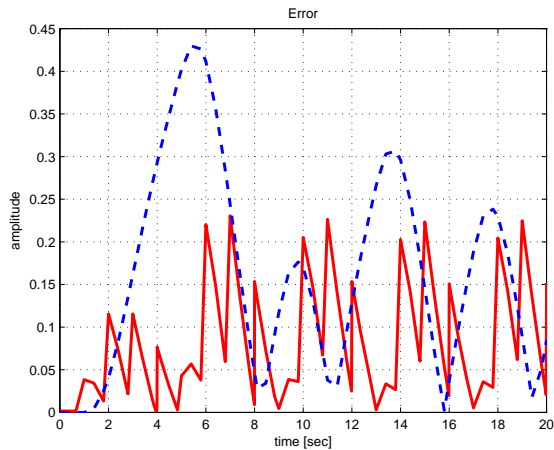


図 4: 回り込み波の影響 $|u(t) - v(t)|$: 提案法 (実線), キャンセル無し (破線)

参考文献

- [1] T. Chen and B. A. Francis: *Optimal Sampled-Data Control Systems*; New York: Springer (1995)
- [2] ゴールドスミス著, 小林訳: ワイヤレス通信工学 基礎理論から MIMO, OFDM, アドホックネットワークまで; 丸善 (2007)
- [3] M. Nagahara and Y. Yamamoto: Optimal discretization of analog filters via sampled-data H^∞ control theory, *Proc. IEEE MSC*, pp. 527–532 (2013)
- [4] 能口, 林, 金子, 酒井: 周波数領域等価システムのための単一周波数全二重無線中継; 信学技報 (2012)
- [5] 岡野, 中原, 沢田, 須賀: 放送波中継 SFN における回り込み波の影響; 1997 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 (1997)
- [6] H. Sakai, T. Oka, and K. Hayashi: A simple adaptive filter method for cancellation of coupling wave in OFDM signals at SFN relay station; *Proc. EUSIPCO 2006* (2006)
- [7] C. E. Shannon: Communication in the presence of noise; *Proc. IRE*, Vol. 37–1, pp. 10–21 (1949)
- [8] Y. Yamamoto, M. Nagahara, and P. P. Khargonekar: Signal reconstruction via H^∞ sampled-data control theory; *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 60, no. 2, pp. 613–625 (2012)