

タイミングスキュー補正用 遅延デジタルフィルタに対する窓関数の検討

立岩 武徳* (群馬大学) 浅見 幸司 (アドバンテスト)

小林 春夫 (群馬大学)

Timing Skew Compensation Using Window Function Consideration of Delay Digital Filter
Takenori Tateiwai* (Gunma University), Koji Asami (Advantest Corporation),
Haruo Kobayashi (Gunma University)

キーワード: タイミングスキュー, 線形位相, デジタルフィルタ, ギブス現象, 群遅延, 窓関数
(Timing skew, Linear phase, Digital Filter, Gibbs phenomenon, Group delay, Window Function)

1. はじめに

本論文では、タイミングスキュー補正用に向けた遅延デジタルフィルタに対する窓関数の掛け方の検討について報告する。

電子デバイスの絶え間無い高速化に伴い、その電子デバイスを試験するためのミクスドシグナル LSI テスタ (半導体試験装置) に対して高性能化の要求が増大している。ミクスドシグナル LSI テスタの代表的なアプリケーションである無線通信用デバイスを試験するために欠かせない技術として、時間インターリーブ AD 変換器と直交変調器の回路システムがある。

近年の広帯域化により、これらの回路システムで発生する微小なタイミングスキューを無視できなくなってきた。タイミングスキューによる影響は、インターリーブ ADC の場合では時間領域でパターンノイズ、周波数領域でスプリアスとして表れる⁽¹⁾⁽²⁾。直交変調器の場合は、I 信号経路と Q 信号経路の直交性が崩れ、ビット誤り率を劣化させる原因となる。これらの誤差は全て、波形品質の劣化となる。

波形品質を保つためにタイミングスキュー補正は LSI テスタ内で頻繁に行われている。ここで、時間領域で信号波形を維持するために、補正に用いられるデジタルフィルタには線形位相特性が求められる。しかし、従来の線形位相デジタルフィルタは群遅延が $N \cdot T_s/2$ (すなわち、群遅延の時間分解能が $T_s/2$) となるため、サンプリング周期の半分の間隔しか調整ができなかった。ここで、 N は FIR デジタルフィルタのタップ数、 T_s はサンプリング周期である。従来の線形位相特性の条件は、フィルタ係数が偶対称または奇対称を有している事であった。我々は、過去の研究報告で、必ずしも偶対称または奇対称を持たない場合

に対して線形位相の条件を拡張し、一般化した⁽³⁾。

しかし、理想的な遅延デジタルフィルタのタップ数は無限項であり、実用上のために窓関数を用いて有限項に打ち切らなければならない。遅延デジタルフィルタの線形位相条件と打ち切りによる効果は、過去の研究で報告した⁽⁴⁾。今回、タイミングスキュー補正用向けの遅延デジタルフィルタに最適な窓関数の選択、掛け方について報告する。

2. 従来の線形位相デジタルフィルタ

線形位相特性は、位相歪みを起こさず時間領域で信号波形を維持する事ができる重要な特性である。偶対称または奇対称の係数を持つ FIR デジタルフィルタは、一般に線形位相特性かつ安定であることが知られている⁽⁵⁾⁽⁷⁾。分母と分子の両方で偶対称または奇対称の係数を持つ IIR デジタルフィルタは、直線的な特性も近似すること実現できるが、不安定である。その為、線形位相特性が要求される場合は、FIR デジタルフィルタが好まれる。しかし、群遅延の時間分解能が $T_s/2$ に制限されるために微小なタイミングスキュー調整に適用することが困難であった。

3. 提案する遅延デジタルフィルタ

提案する遅延デジタルフィルタは、偶対称または奇対称の係数を持たないデジタルフィルタに対して、線形位相特性の条件を拡張したフィルタである。

予め補正したいタイミングスキューを測定しておき、従来の FIR デジタルフィルタのインパルス応答を、スキュー分遅延させることで補正特性を持たせる。しかし遅延させることで、フィルタ係数が対称性を失い非対称となり IIR 特性を示す。これに窓関数を掛けて、有限項で打ち切り再

び FIR 特性に戻す事で提案するタイミングスキュー補正用遅延デジタルフィルタとして使用する。遅延デジタルフィルタが線形位相特性を示す証明⁽¹⁾⁽⁶⁾を参照。

図 1 に 61 タップで設計した提案する遅延デジタルフィルタの振幅特性と群遅延特性を示す。与えた遅延量は 0.3 sampling points である。ここで、群遅延特性にギブス現象が観測される。一般的に FIR フィルタの場合、ギブス現象は群遅延特性で観測されないが、インパルス応答が非対称となっているために群遅延特性にギブス現象が発生し、窓関数を掛けることでリップルを抑制できる事を MATLAB シミュレーションで確認した。

4. 遅延デジタルフィルタに対する窓関数決定

窓関数の種類は様々であり、掛ける窓関数によってフィルタの周波数特性が異なってくる。この章では、提案する遅延デジタルフィルタの群遅延特性に発生するリップルの抑制に効果的な窓関数の掛け方について説明する。また、群遅延リップルの抑制に最適な窓関数に求められる要素について説明する。

4-1. 群遅延リップルの抑制に有効な窓関数の掛け方

窓関数の掛け方について説明する。図 2 に二通りの窓関数の掛け方について示す。図 2(a)は原点を中心として対称に窓関数を掛け、図 2(b)はインパルス応答を中心として対称に窓関数を掛ける。MATLAB で窓関数の掛け方をシミュレーションした結果を図 3 に示す。ここで、フィルタ・タイプはバンドパスフィルタ、フィルタのタップ数は 101、乗算器のビット数は理想状態、与えた遅延量は 0.1 sampling points、窓関数はハン窓を使用した。

シミュレーション結果から図 2(b)の掛け方が群遅延誤差の抑制に効果的であり、遅延デジタルフィルタの通過域が広く取れる事を確認した。

4-2. 群遅延リップルの抑制に有効な窓関数の選び方

群遅延リップルの抑制に効果的な窓関数の選び方について説明する。窓関数の効果を確かめるためにカイザー窓を使用する。カイザー窓は、設計パラメータ α を変化させることでダイナミックレンジと周波数分解能を連続的に変化させる事ができる窓関数である。 α の値が大きいほど、周波数領域でメインローブが広く、サイドローブが低くなる。すなわち、周波数分解能は粗く、ダイナミックレンジは広くなる。図 4 に α の値 (点線は $\alpha = 3.3953$ 、鎖線は $\alpha = 5.6533$ 、破線は $\alpha = 7.8573$ 、実線は $\alpha = 10.0613$) を変化させた 4 つのカイザー窓の時間応答と周波数応答を示す。この 4 つのカイザー窓を提案する遅延デジタルフィルタに掛けた場合のタップ数と群遅延リップルの関係をシミュレーションした (図 5、6)。ここで、フィルタ・タイプはバンドパスフィルタ、フィルタのタップ数は 101、乗算器のビット数は 18 bit、与えた遅延量は 0.1 sampling points、窓関

数はインパルス応答を中心として対称に掛けた。図 5 は横軸をタップ数、縦軸を群遅延誤差の標準偏差でプロットしたもの。図 6 は横軸をタップ数、縦軸を群遅延誤差の最大誤差でプロットしたもの。図 5、6 の点線、鎖線、破線、実線は図 4 のそれに対応している。

シミュレーション結果から、図 4(a)のように振幅がゼロに落ちきっていない点線、鎖線のカイザー窓は群遅延リップルを抑制できていないことがわかった。さらに図 5(b)、6(b)から、破線より実線のカイザー窓の方が群遅延リップルの抑制に効果的であることがわかった。この事から周波数分解能を犠牲にしてダイナミックレンジを広くした窓関数の方が、遅延させたデジタルフィルタに表れる群遅延リップルを抑制するのに適していることがわかった。

5. まとめ

本論文では、群遅延リップルを抑制する為の窓関数に関する研究成果を報告した。窓関数を掛ける場合はインパルス応答を中心として対称に掛ける、すなわち、補正する遅延に合わせて窓関数も遅延させた方が群遅延リップルを抑制するのに効果がある。また、バンドパスフィルタの場合も有効であった。また、窓関数のサイドローブが低いものを選択した方が群遅延リップルの抑制に効果がある。

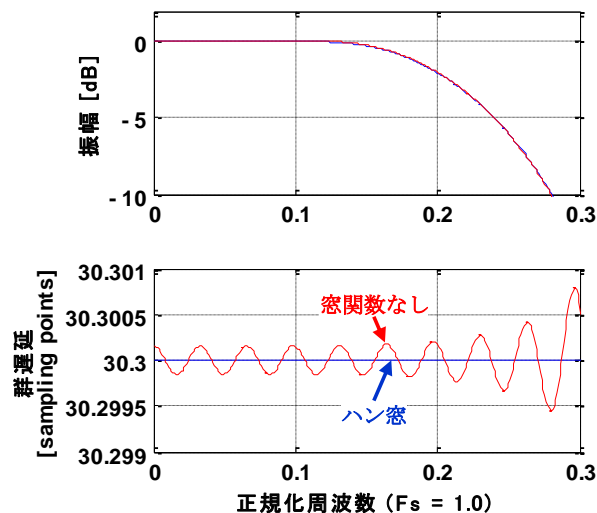


図 1 窓関数を掛けた場合と掛けていない場合の提案する遅延デジタルフィルタの振幅特性と群遅延特性

Fig. 1. Gain and group delay characteristics of the proposed digital filter with and without applying Hann window.

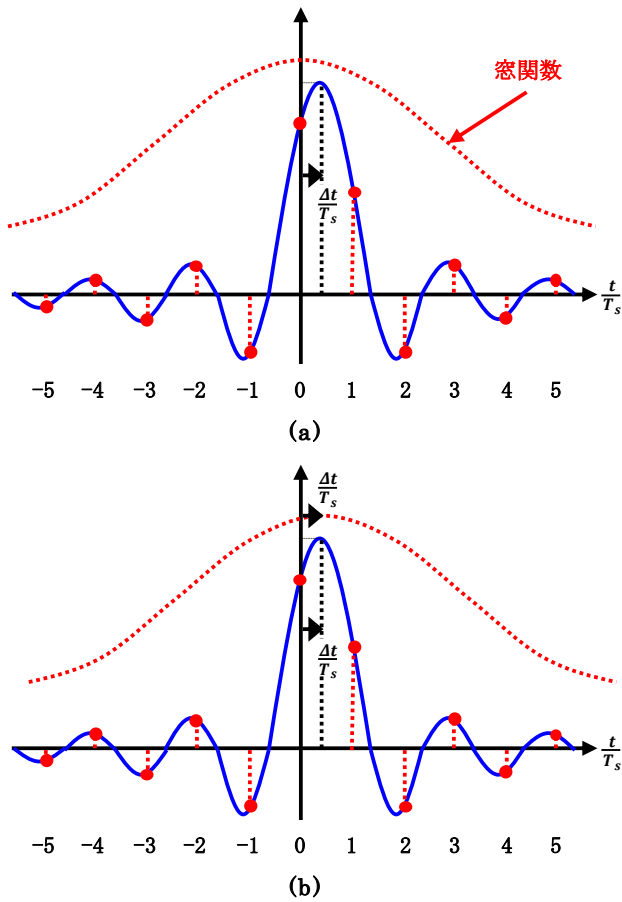


図2 窓関数の掛け方 (a) 原点を中心に対称な窓関数 (b) インパルス応答を中心に対称な窓関数
 Fig. 2. Window application methods with Symmetric window function. (a) Centered on the origin. (b) Centered on impulse response.

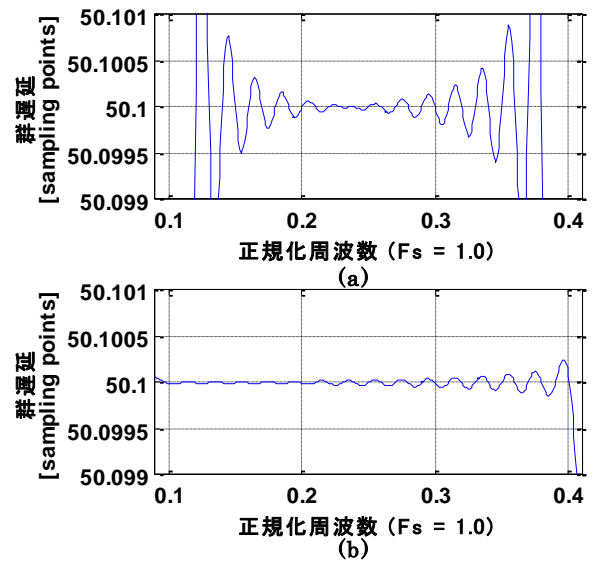


図3 窓関数の掛け方の違いによる遅延デジタルフィルタの群遅延特性 (a) 原点を中心に掛けた場合 (b) インパルス応答を中心にした場合
 Fig. 3. Group delay characteristics of the digital filter delay applied to different window function (a) Centered on the origin. (b) Centered on impulse response.

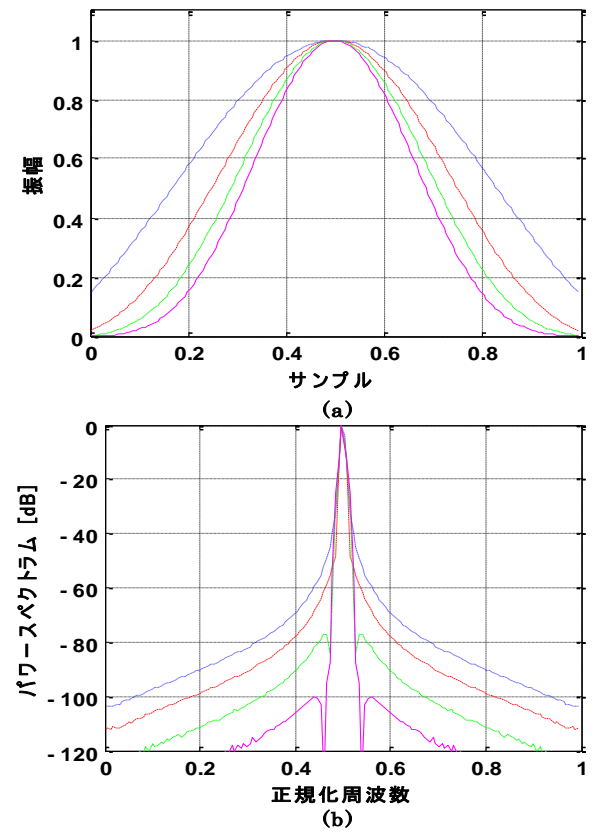


図4 設計パラメータ α を変化させたカイザー窓
 Fig. 4. Kaiser window with differed parameter α .

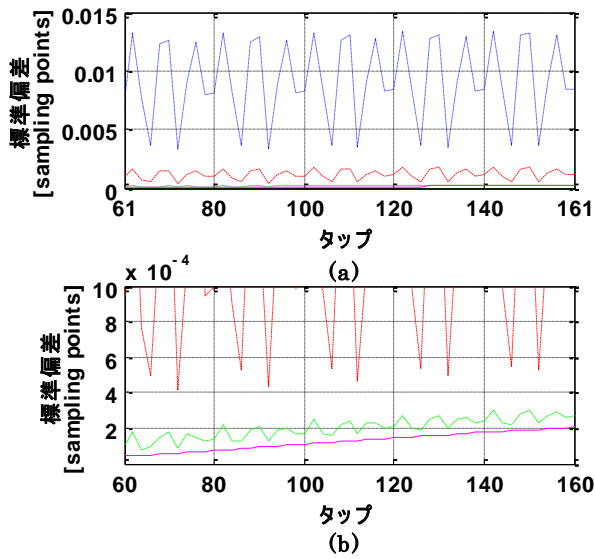


図5 カイザー窓を掛けた場合の標準偏差とタップ数
(a) 全体図 (b) 拡大図

Fig. 5. Group delay error of standard deviation and taps with Kaiser window applied. (a) Overall view (b) Enlarged view

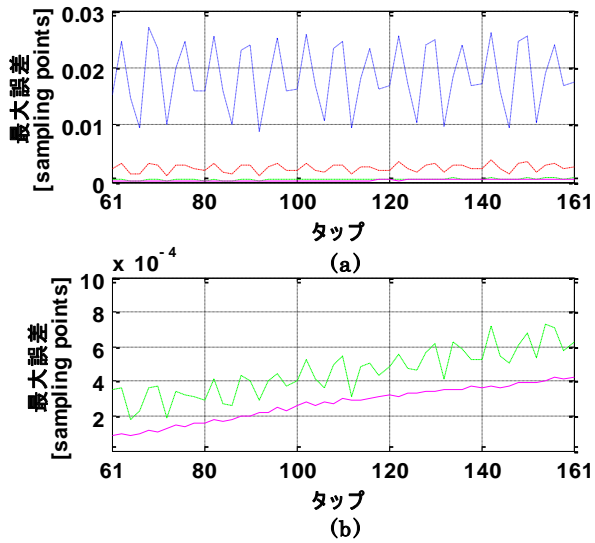


図6 カイザー窓を掛けた場合の最大誤差とタップ数
(a) 全体図 (b) 拡大図

Fig. 6. Group delay error of maximum error and taps with Kaiser window applied. (a) Overall view (b) Enlarged view

文 献

(1) N. Kurosawa, H. Kobayashi, K. Maruyama, H. Sugawara, and K. Kobayashi : "Explicit Analysis of Channel Mismatch Effects in Time-Interleaved ADC Systems", IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, vol.48, no.3, pp.261-271 (March 2001).

(2) N. Kurosawa, H. Kobayashi, and K. Kobayashi : "Channel Linearity Mismatch Effects in Time-Interleaved ADC Systems", IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E85-A, no. 4, pp.749-756 (April 2002).

(3) K. Asami, H. Miyajima, T. Kurosawa, T. Tateiwa, and H. Kobayashi, : "Timing Skew Compensation Technique Using Digital Filter with Novel Linear Phase Condition," IEEE International Test Conference, Paper 11.3, Austin, TX (Nov. 2010).

(4) 浅見幸司, 立岩武徳, 易茹, 荒川雄太, 黒沢烈士, 宮島広行, 小林春夫 : 「線形位相遅延デジタルフィルタの実装の検討」, 第 13 回 DSPS 教育者会議, ポスターセッション, 東京都市大学, (2011 年 9 月 2 日)

(5) R. W. Hamming : "Digital Filters", Prentice Hall (1989).

(6) H. P. Hsu : "Fourier Analysis", Simon and Schuster: New York (1970).

(7) A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer : "Digital Signal Processing", Prentice Hall (1975).

(8) K. Asami, T. Tateiwa, T. Kurosawa, H. Miyajima, and H. Kobayashi, : "Digitally-Assisted Compensation Technique for Timing Skew in ATE Systems", IEEE International Mixed-Signals, Sensors, and Systems Test Workshop, Santa Barbara, CA (May. 2011).