

オーディオ・インタフェースの入出力フィルタ特性の検討

志賀 正徳[†] 小林 慶弘[†] 落合 裕一[†] 金田 豊[†] 福島 裕一[‡]

[†] 東京電機大学工学部 〒101-8457 東京都千代田区神田錦町 2-2

[‡] 株式会社オンソク 〒169-0075 東京都新宿区高田馬場 3-18-25

E-mail: [†] [06kc064@ed.cck, 08gmc14@ms, 09kmc09@ms, kaneda@c].dendai.ac.jp,

[‡] fukushima@onsoku.co.jp

あらまし 近年、PC に接続できるオーディオ・インタフェース (AIF) が音響計測に広く利用されている。本報告では、AIF に含まれる低域通過フィルタ (LPF) および高域通過フィルタ (HPF) の特性について調査を行った。その結果、1) 折り返し歪防止 LPF は、通過周波数域の平坦性を確保するために、ナイキスト周波数 $F_s/2$ でもあまり減衰させておらず、折り返し歪による測定誤差が発生する点に注意が必要、2) LPF の時間応答には、直線位相性を重視したフィルタと応答の因果性 (立ち上がり) を重視したフィルタがある、3) AIF には直流成分をカットするための HPF が含まれており、そのインパルス応答は原点で不連続であり、応答時間も長い、ことなどがわかった。

キーワード オーディオ・インタフェース、フィルタ特性、低域通過フィルタ、高域通過フィルタ、インパルス応答

A study on the input-output characteristics of audio interface for PC

Masanori SHIGA[†] Yoshihiro KOBAYASHI[†] Hirokazu OCHIAI[†]

Yutaka KANEDA[†] and Hirokazu FUKUSHIMA[‡]

[†] Faculty of Engineering, Tokyo Denki University, 2-2 Nishikicho, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8457 Japan

[‡] ONSOKU ELECTRONIC CORPORATION, 3-18-25 Takadanobaba, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-0075 Japan

E-mail: [†] [06kc064@ed.cck, 08gmc14@ms, 09kmc09@ms, kaneda@c].dendai.ac.jp,

[‡] fukushima@onsoku.co.jp

Abstract Recently, an audio interface (AIF) that can connect with a personal computer (PC) has been widely used in acoustic measurements. In this study, we investigated the characteristics of a low-pass filter (LPF) and a high-pass filter (HPF) implemented in an AIF. The main results are as follows: 1) The LPF response does not fully attenuate at Nyquist frequency $F_s/2$ to maintain the flatness of the pass-band response; hence, measurement error occurs owing to aliasing. 2) Two types of LPF time response, namely, linear-phase response and steep onset time response, are observed. 3) The AIF implements the HPF to cut the DC component, and its response is discontinuous at the time origin and continues for a long time.

Keyword audio interface, filter characteristic, low-pass filter, high-pass filter, impulse response

1. はじめに

オーディオインターフェイス (以下、AIF と略す) とは、DA 変換器と AD 変換器を内部に持って、パーソナルコンピュータ (以下 PC) から音響信号を入出力するためのインタフェースである。近年、高性能で低価格な AIF の開発が進み、音響信号の計測・研究用途に広く利用されるようになってきた。しかし、本来オーディオ用途として設計された AIF が、計測用途として望ましい特性を持っているという保証はない。そこで AIF を利用するにあたって、その特性を把握しておくことは重要であると考えられる。

本稿では AIF の持つ低域フィルタ、高域フィルタの特性に対して注目して、その測定結果を報告する。

2. AIF が持つフィルタ

AIF は、DA 変換器と AD 変換器を含んでおり、それぞれに低域通過フィルタ (以下、LPF: Low Pass Filter)、および、高域通過フィルタ (以下、HPF: High Pass Filter) が設置されている。

DA 変換器の後段には、デジタル信号が含む不要な高周波成分をカットするための (別の言い方では、デジタル時系列を補間するための [1]) LPF が設置されている。また、AD 変換器の前段には、折り返し歪防止のための LPF が設置されている。

一方、DA から直流成分が出力され、スピーカやイヤホンに供給されると振動板にバイアスが生じて歪発

生の要因となるため、DAの後段には直流カットのためのHPFが設置されている。また、音響信号は本来、交流であるので、ADで録音する場合には、電氣的バイアスなどの直流成分をカットしたいという考えで、ADにHPFが設置されている。

LPF、HPFを含んだPC-AIFの音響信号入出力系のブロック図を図1に示した。これらのうちLPFは、DA変換およびAD変換には必須のものである。HPFは必須ではないが、AIFには設置されていることが多い。

なお図1では、フィルタはすべてアナログ信号に対するフィルタとして描かれているが、これらはデジタルフィルタとして、PCやAD・DAの内部に設置されることもある。例えば、AD系のHPFは、ADでデジタル化された後にデジタルフィルタとして実現される場合がある。また、ADのLPFも、 $\Sigma\Delta$ 方式などでは、高速1ビットでAD変換されたあと、AD内部のデジタルLPFで不要帯域を除去する。

以下、これらのフィルタの周波数振幅特性（以下、振幅特性と略称）およびインパルス応答の測定結果を報告する。今回対象としたAIFは、表1に示したローランド社製の3機種である。

3. 各特性の測定方法

一般的にはインパルス応答をADを用いて測定し、それをPCでフーリエ変換すれば周波数特性が得られる。しかし、今回は、表2に示した測定法概要のように、一部を正弦波応答により測定した。以下、その理由などを説明する。

(a) ADのLPFの振幅特性

本報告では、サンプリング周波数をFsと表した時、Fs/2（ナイキスト周波数）以上の周波数に対するLPF応答を調査した。その場合、Fs/2以下の成分を前提としたインパルス応答法は利用できない。そこで、正弦波発振器から、いろいろな周波数の正弦波をAIFに入力して、録音されたデジタル信号の大きさを計算することでLPFの振幅特性を求めた。

(b) ADのLPFのインパルス応答

アナログパルス信号または十分広帯域なDAパルス出力をADで録音しインパルス応答を得た。

(c) DAのLPFのインパルス応答と振幅特性

DAからパルス信号を出力し、それをADで録音してインパルス応答を得た。ただし、測定対象であるDAの出力としては、Fs/2以上の成分が出力されることがあるので、ADのサンプリング周波数は、DAのその数倍に設定した。一般に、同じAIFで、DAとADを異なるサンプリング周波数は設定できないので、AIFを2台用意（必要ならPCも2台）してインパルス応答を測定した。Fs/2付近の振幅特性は得られたインパ

AIF (オーディオインタフェース)

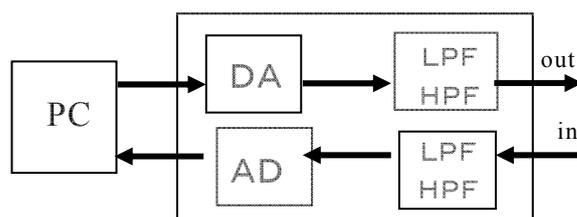


図1. LPF,HPFを含んだPC-AIF測定系。ただし、フィルタは、AD,DAやPCに含まれる場合もある。

表1 測定対象としたAIF

機種 (ローランド社製)	チャンネル数	設定できるサンプリング周波数Fs0(kHz)
UA-1EX	2	32,44.1,48,96
UA-25	2	44.1,48,96
UA-101	8	44.1,48,88.2,96,192

↑ 上位機種

表2 各特性の測定方法の概要

測定対象	特性	測定方法	備考
AD-LPF	幅	(a)正弦波応答	Fs/2以上を調べる
	波	(b)インパルス応答	アナログインパルス
DA-LPF	幅・波	(c)インパルス応答	高Fsを使用
AD-HPF	幅・波	(d)インパルス応答	アナログインパルス
DA-HPF	幅	(e)正弦波応答	ADは使用できない
	波	(f)インパルス応答	オシロによる観測

幅：振幅特性、波：インパルス応答波形

ルス応答をフーリエ変換して得た。

(d)ADのHPFのインパルス応答と振幅特性

ADのLPFのインパルス応答の場合(b)と同じ

(e)DAのHPFの振幅特性

ADもHPFを有しているため、DAのHPFによる直流除去特性にADを用いた測定は利用できない。そこで、PCのプログラムによりDAから周波数の異なる正弦波を発生させ、そのアナログ出力レベルを電圧計で測定して振幅特性を得た。

(f)DAのHPFのインパルス応答

DAから周期パルスを発生させ、オシロで観測した。

4. AD系LPFの振幅特性

4.1. ハードウェアLPFとソフトウェアLPF

AIFでデジタル録音する場合のブロック図を図2に示す。このとき、図に示したように、ハードウェアLPFとソフトウェアLPFが存在する。

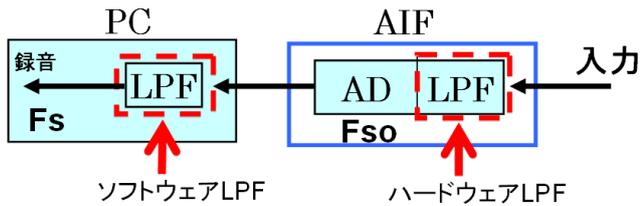


図 2. AIF でデジタル録音する場合のブロック図

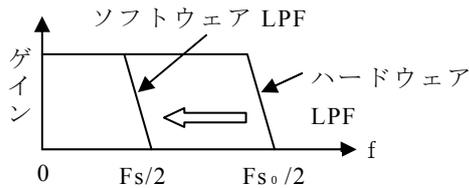


図 3. ソフトウェア LPF の効果のイメージ図

通常、AIF は、スイッチやダイヤルで設定される AIF 自身のハードウェア的なサンプリング周波数 F_{so} を持っている。このとき、サンプリング定理より、ナイキスト周波数 $F_{so}/2$ 以上の周波数が含まれると折り返し歪が発生する。これを防ぐために、AD 変換器の前段には、 $F_{so}/2$ 以上の周波数をカットする LPF が設けられている。これをハードウェア LPF と呼ぶことにする。

一方、ソフトウェア LPF は、PC 内でソフトウェア処理される LPF である。一般に、AIF 自身に設定できるハードウェア的なサンプリング周波数 F_{so} の種類は限られていることが多い。例えば、表 1 に示したように UA-1EX では、32、44.1、46、96 kHz の 4 種類である。しかし、例えば、Windows に標準搭載されている MME 等のドライバを使うと（Windows の場合、MME がデフォルトであることが多い）、任意のサンプリング周波数 F_s ($F_s \leq F_{so}$) をプログラムで指定することができる。その際 AIF において F_{so} でハード的にサンプルされた信号は、このドライバの内部で、 $F_s/2$ に帯域制限された後、指定のサンプリング周波数 F_s にダウンサンプルされる（図 3）。この帯域制限に使用されるのが、ソフトウェア LPF である。

4.2. 測定結果

AIF のサンプリング周波数 F_{so} は 48kHz に固定し、プログラムで指定するサンプリング周波数 F_s を 48kHz として、ハードウェア LPF の特性を測定した。また $F_s=8, 24$ kHz としてソフトウェア LPF の特性を測定した。測定方法は 3 章に述べた方法による。

図 4 にハードウェア LPF の周波数特性の測定結果を示す。図において横軸は $F_s/2$ で正規化した周波数を表

す。ただし、 $F_s/2$ 以上の正弦波は、折り返されてデジタル化されるが、図では入力した正弦波の周波数に変換して表示した。測定結果から次のような特徴がわかった。

- ① 各 AIF によって異なった遮断特性が得られ、遮断特性は、UA-101,UA-25,UA-1EX の順に急峻だった。
- ② 各特性に共通的に言えることは、LPF の通過周波数域の平坦性を確保するために、 $F_s/2$ でも減衰量は小さい。その結果、 $F_s/2$ の 1.1 倍～1.15 倍の周波数成分に対しては折り返し歪が発生する。よって、 $F_s/2$ の 0.85 倍～0.9 倍までの周波数には、折り返し歪による測定誤差が発生している可能性がある。

図 5,6 に、ソフトウェア LPF の周波数特性の測定結果を示す。図 5 は $F_s=8$ kHz、図 6 は $F_s=24$ kHz の場合である。図 4 と同様に、横軸は $F_s/2$ で正規化した周波数を表す。測定結果から次のような特徴がわかった。

- ③ $F_s/2$ 付近で特性の平坦性は失われているが、折り返し歪による測定誤差が発生する周波数範囲は、やや狭く、 $F_s/2$ の 0.95 倍程度までの周波数である。
- ④ 図 5,6 とともに、3 種類の AIF は同一の特性となっている。このことは、ハードウェアに依存しないソフトウェア LPF の特性が測定できていることを裏付けている。
- ⑤ 図 5,6 のように、 $F_s/2$ で正規化すると、 F_s の値によらず同一の特性になっている。

5. AD 系 LPF のインパルス応答

AD 系 LPF のインパルス応答の測定結果を図 7,8,9 に示す。図 7 は、UA-1EX、UA-25 のインパルス応答を重ね書きしたものである。また、図 8 は、図 7 の振幅を拡大表示したものである。図 9 は、UA-101 のインパルス応答である。これより以下のことがわかる。

- ① UA-1EX、UA-25 は、デジタル LPF の応答としてよく見られる直線位相特性を持った(左右対称の) sinc 関数に窓関数をかけたような応答波形となっている。
- ② 図 8 の拡大図より、UA-25 のほうが応答が左右に長く持続している。これは、デジタルフィルタのタップ長が長いことを示しており、その結果、図 5 で見られるような遮断特性の差となっていると考えられる。
- ③ 図 9 より、UA-101 のインパルス応答は、最大振幅の右半分のみ応答が存在する形をしている。これは図 7 のような直線位相の特性ではないが、急峻な立ち上がりを持ち、過渡信号を AD する場合に、非因果的な部分にプリエコーなどが発生しない応答特性と考えられる。

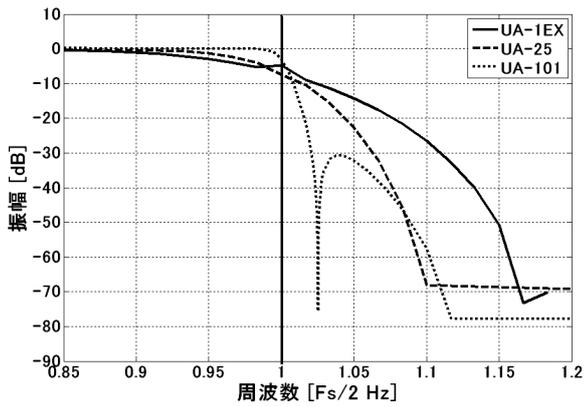


図 4. ハードウェア LPF の周波数振幅特性

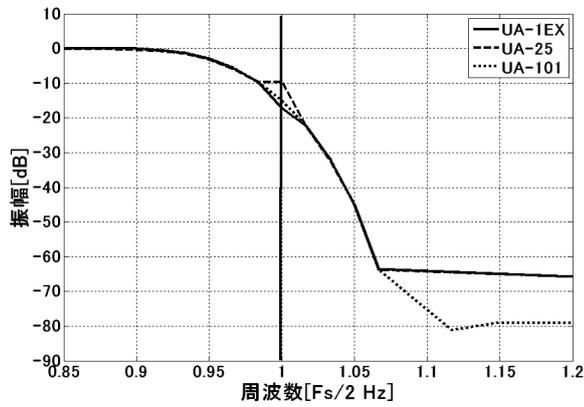


図 5 LPF の周波数振幅特性 ($F_s = 8 \text{ kHz}$)

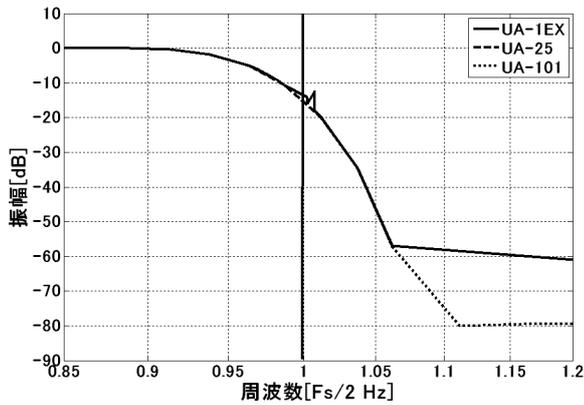


図 6 LPF の周波数振幅特性 ($F_s = 24 \text{ kHz}$)

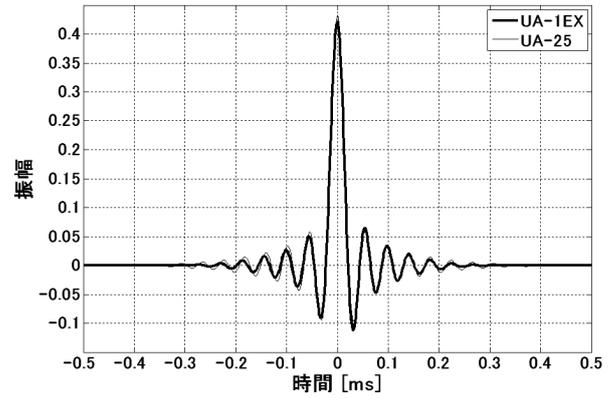


図 7 UA-1EX と UA-25 の AD 系のインパルス応答

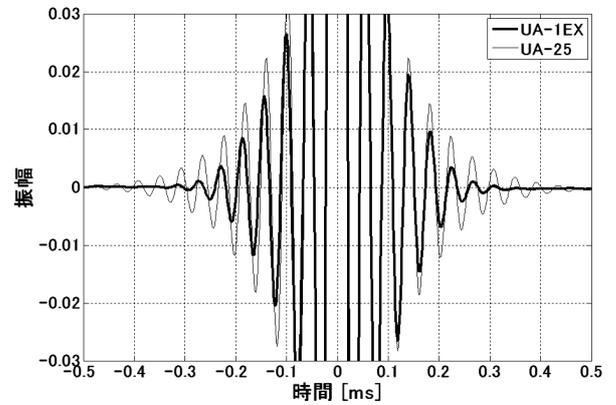


図 8 図 7 の振幅拡大図

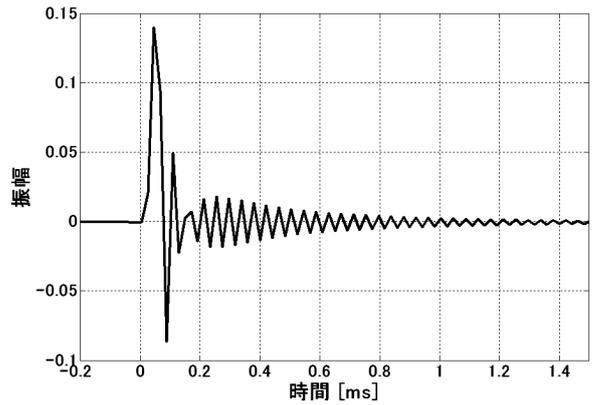


図 9 UA-101 の AD 系のインパルス応答

6. DA 系 LPF の特性

図 10 に $F_s = F_{s0} = 48 \text{ kHz}$ としたときの UA-1EX の DA 系のインパルス応答を示す。このインパルス応答はハードウェア LPF の特性を反映した sinc 関数型になっている。また、図 11 に、それをフーリエ変換した振幅特性を示す。図より、

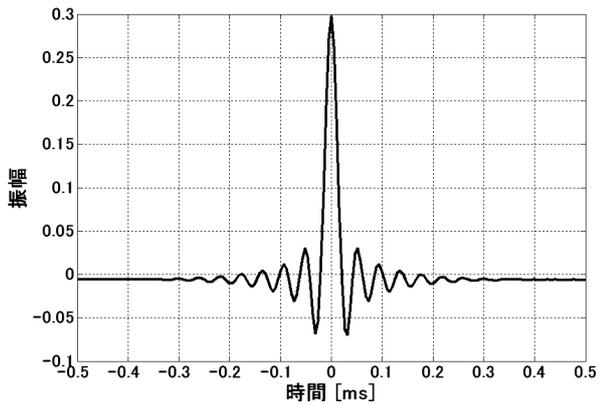


図 10 UA-1EX の DA 系 LPF のインパルス応答

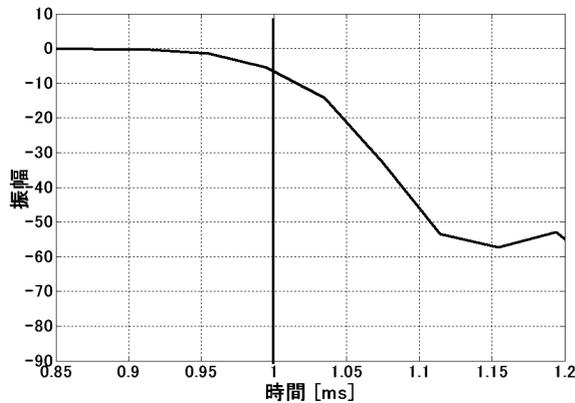


図 11 UA-1EX の DA 系 LPF の振幅特性

① DA 系の LPF も $F_s/2$ 以上にもゲインを持ち、折り返し歪（例えば、 f_0 [Hz] の正弦波を PC から出力すると、同時に、 $F_s - f_0$ [Hz] の正弦波もアナログ出力される）が発生する。

今回対象とした AIF の DA 系は同一 IC を用いており、他の AIF も同一特性であった。また、紙面の都合で図は省略するが、 $F_s \leq F_{s0}$ としてソフトウェア LPF は AD 系のソフトウェア LPF と同一の特性であった。

7. AD 系・DA 系 HPF の振幅特性

図 12,13,14 に各 AIF の AD 系・DA 系 HPF の振幅特性測定結果を示す。図においては DA 系の HPF と AD 系の HPF のサンプリング周波数を $F_s = F_{s0} = 48,96\text{kHz}$ と 2 種類で測定した結果を重ね書きした。図より、以下のことがわかる。

- ① DA 系 AD 系ともに、カットオフ周波数が約 0.3Hz ~ 10Hz 程度の低域遮断振幅特性となっている
- ② DA 系ではサンプリング周波数によらず同一特性であるので、DA 出力の後段に設置されたアナログ HPF ではないかと考えられる。一方、AD 系ではサンプリング周波数によって特性が異なるので、デジタル HPF も含まれているものと考えられる。

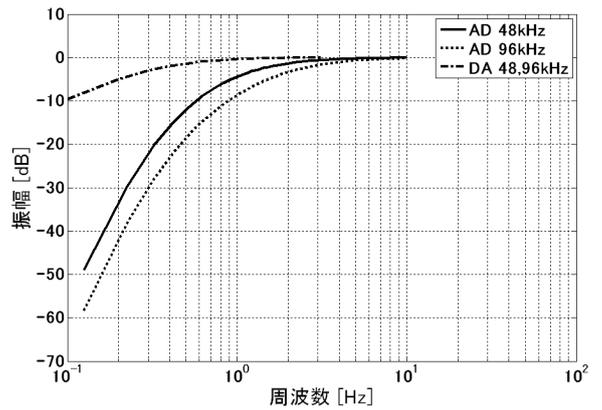


図 12 EDIROL UA-1EX

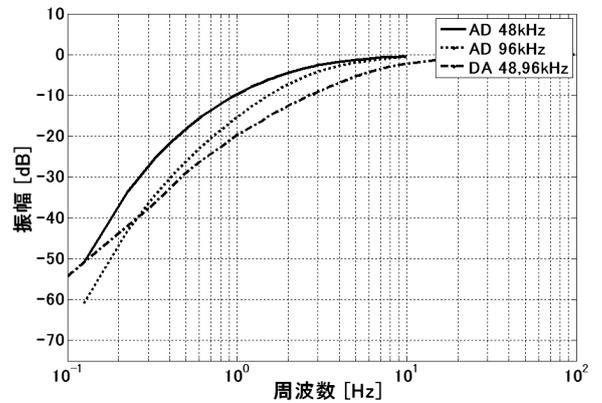


図 13 EDIROL UA-25

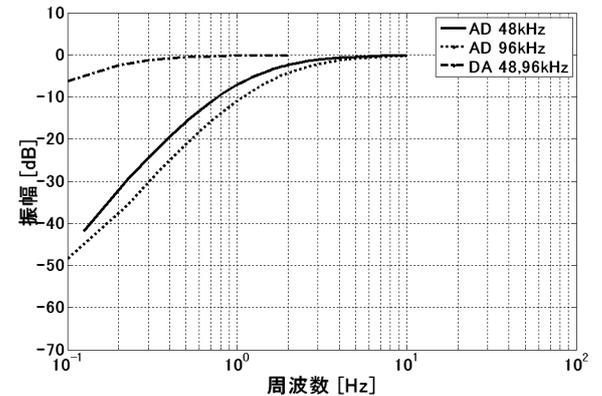


図 14 EDIROL UA-101

なお、これらの特性は $F_s < F_{s0}$ としても変わらなかった。

8. HPF の時間応答特性

8.1. 時間応答特性の理論検討

想定される直流除去 HPF のアナログ回路を図 15 に、デジタル HPF のブロック図を図 16 に示す。図 16 のデジタルフィルタのインパルス応答は、図 17 に示すように原点 ($t=0$) で不連続となり、 $t>0$ では負のバイア

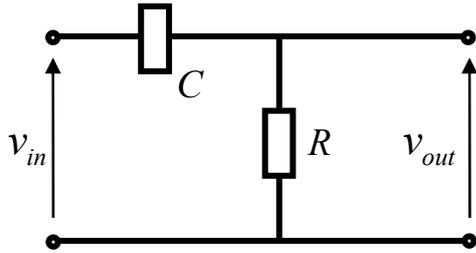


図 15 想定される直流除去アナログフィルタ（一次）

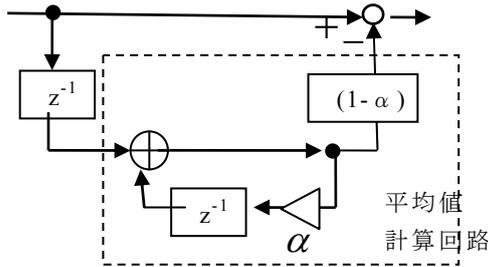


図 16 想定される直流除去デジタルフィルタ

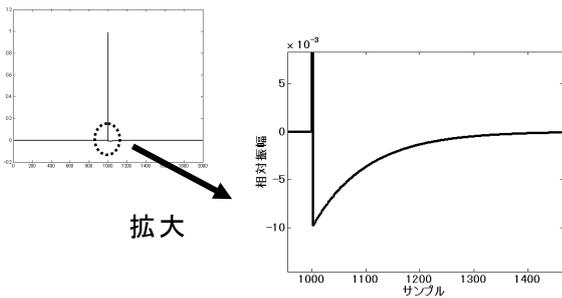


図 17 図 15 の RC 回路のインパルス応答計算値

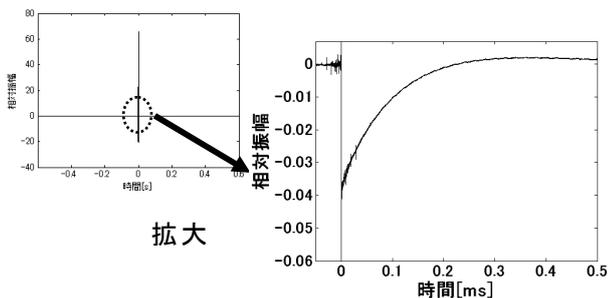


図 18 直結条件のインパルス応答とその拡大図

スがかかったような波形となる。一方、図 15 のアナログ回路の単位ステップ応答 $h_u(t)$ は、

$$h_u(t) = u(t) \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

となる。ただし、単位 $u(t)$ ステップ信号を表す。イン

パルス応答は、これを微分して、

$$h(t) = \delta(t) - \frac{1}{RC} e^{-\frac{t}{RC}} \cdot u(t)$$

となる。この応答も図 17 と同様の波形となる。また、時定数 RC とカットオフ周波数 f_c とは、

$$RC = 1/2\pi f_c$$

の関係を持ち、例えば、 $f_c = 0.3 \text{ Hz}$ というような場合には、 $RC = 0.5 \text{ 秒}$ という長い応答波形となる。デジタルフィルタの場合もほぼ同様の応答となる。

8.2. 時間応答特性の測定結果

図 18 は、UA-1EX の DA と AD とを直結したときのインパルス応答を表している。図より、原点付近の不連続性、および、長時間継続する応答が見て取れる。

図は縦軸を拡大しているの、全応答エネルギーから比べると、微小な応答ではある。しかし、このような長時間継続する応答は、例えば、周期信号の 1 周期の先頭と最後の値の不一致を引き起こす場合などがあるので、注意が必要となる。

9. むすび

本報告では、AIF に含まれる低域通過フィルタ (LPF) および高域通過フィルタ (HPF) の特性の測定を行った。その結果、

- ・ AD 変換器に含まれる折り返し歪防止 LPF は、通過周波数域の平坦性を確保するために、 $F_s/2$ でもあまり減衰させておらず、折り返し歪による測定誤差が発生する点に注意が必要ながわかった。

- ・ LPF の時間応答には直線位相性を重視したフィルタと応答の因果性 (立ち上がり) を重視したフィルタがあることを示した。

- ・ DA 系および AD 系には、直流成分を除去するために、カットオフ周波数が $0.3 \sim 10 \text{ Hz}$ 程度の、HPF が含まれている。

- ・ この HPF 時間応答は原点で不連続な応答であり、また、応答が長時間継続していることに注意が必要などを明らかにした。

文 献

- [1] 大賀寿郎 ほか、音響システムとデジタル処理, pp.53, (社) 電子情報通信学会, 東京, 1995.