

解析信号を用いたサンプリング・ジッター測定における誤差の検討*

○ 西村 明、 小泉 宣夫 (東京情報大)

1. はじめに

DA/AD 変換時のサンプリングクロックに生じる時間ゆらぎ (サンプリング・ジッター) は、記録や再生時にひずみをもたらす原因のひとつである。前報 [1] では、従来法より高精度なサンプリング・ジッター測定法として、解析信号を用いて、DA/AD 変換器に生じている周波数および振幅変動波を時間領域において測定する方法を提案した。

この測定手法は、DA および AD 変換器を含む測定系に生じるあらゆる歪み成分を、信号音に対する振幅変動および周波数変動成分に分解して測定するため、それら歪み成分の存在が、測定結果への誤差要因として考えられる。本報告では、それらの誤差要因が測定結果にどの程度影響を及ぼしているかを、理論および実測によって明らかにすると共に、誤差を低減する改善法とその効果を示すことを目的とする。

2. 解析信号を用いるジッター測定

角周波数 ω_c の正弦波を DA 変換し、すぐさま AD 変換する測定系を考える。このとき測定系において、任意の振幅変動 $a(t)$ 、そして角周波数 ω_m 、振幅 J である正弦波のジッターが付加されたときの観測信号の時間波形 $x(t)$ を示す。

$$x(t) = a(t) \sin(\omega_c(t + J \sin(\omega_m t))) \quad (1)$$

$x(t)$ の解析信号 $y(t)$ は、

$$y(t) = a(t) \exp(j(\omega_c(t + J \sin(\omega_m t)) - \pi/2)) \quad (2)$$

となる [2]。解析信号は DFT によって求めることができるので、その瞬時位相角と搬送周波数より、測定系において生じるジッター波形と、振幅変動波形を同時に求めることができる [1]。

実際には、観測音の ω_c は、DA および AD 変換器間のサンプリング周波数の僅かな差によって、測定用信号の ω_c とは僅かに異なる。このため観測音の ω_c は、観測音の瞬時周波数を平均して求める。

3. 誤差要因と回避法

ここでは、CD-R に記録された測定信号を CD プレーヤより再生し、AD 変換した後の観測音を用いて行った実測における誤差要因とその回避方法、それらの理論的背景を示していく。

3.1 純音性歪み成分

Fig.1 には、11025Hz 信号音の観測音のパワースペクトルを示した。ジッターや振幅変動成分が存在すれば、信号周波数に対して対称な周波数に側帯波が現れるはずであるが、そうでない純音性の歪み成分が複数存在することが分かる。

純音性歪みの原因として、回路の発振音、量子化歪み、高調波歪みなどがある。純音性歪みの存在は、観測音の瞬時周波数における推定誤差につながり、ジッター波に一次トレンド成分となる誤差を与える。この誤差は、得られたジッター波から最小自乗法によって一次トレンド成分を導き、それを差し引くことによって回避することができる (Fig.2)。

さらに純音性の歪み成分は、その成分周波数と信号音周波数の差分に当たる周波数の周波数変動および振幅変動としても観測される。測定信号音周波数をサンプリング周波数の 1/4 以上とすると、高調波歪みはジッター測定対象範囲から追いやることのできる。Fig.3 には測定周波数が 12kHz のときの観測音のパワースペクトルを、Fig.4 に得られたジッタースペクトルを示した。信号音周期がサンプリング周期の整数倍でないと、AD 変換後のデジタル信号に量子化歪みが目立ち、測定誤差となる場合がある。

純音性の歪み成分によって誤観測されるジッター周波数は、信号周波数が異なれば、その都度変化することになる。一方本当のジッター周波数とその振幅は、信号周波数が異なっても変化しない。よって、複数の信号周波数での測定結果を比較した場合、共通して

* Errors in measurement of sampling jitter using analytic signals

現れるスペクトルが本当のジッター成分であることが分かる。Fig.5 に、Fig.2 と 4 に共通するジッター成分を、両者の最小値を選ぶことによって示した。

3.2 ランダム雑音性歪み成分

測定信号音 (f [Hz]) のレベルに対して、測定系のノイズフロアレベルが x [dB/Hz] のとき、ジッタースペクトル上のノイズフロアは最大でも $10^{(x/20)}/(\pi f)$ [s] となる。つまり、信号周波数とそのレベルはいずれも高い方が、測定系に存在するノイズフロアの影響を受けにくい。Fig.6 には、信号音周波数が 14.7kHz のときのジッタースペクトルを示した。Fig2 に比べて、ほぼ理論値通りジッターノイズフロアが 3/4 になっていることが分かる。ただしこの場合、理論的なジッター測定上限周波数はナイキスト周波数と信号音周波数の差である 7350Hz となる。

3.3 測定系の位相特性と振幅特性

測定系の振幅/位相特性に歪みがあると、ジッターや振幅変動によって生じる側帯波のレベルや位相が変わってしまい、変動量を過小/過大評価してしまう問題がある。例えば、信号音振幅に対して y 倍の側帯波振幅を持つ周波数変動のみが存在する測定系が、その高域側の側帯波レベルを z dB 下げるとような振幅特性をもつ場合、信号音振幅に対して $(1 - 10^{-z/20})y$ となる本来は存在しない振幅変動が見かけ上生じ、ジッター振幅値も $1 + 10^{-z/20}$ 倍に過小評価される。

一般的なデジタル機器の振幅特性 (± 1 dB) や位相特性 (± 0.1 rad.) からすれば、存在する変動成分の過小および過大評価量は大きいたことはないが、強い変動成分が存在すれば、位相あるいは振幅特性の歪みが僅かであっても、実際には存在しない変動成分を誤測定してしまう恐れがある。紙面の都合上結果は示さないが、これを避けるには系のインパルス応答をあらかじめ測定しておき、その逆特性を観測音に畳み込んだ後に計算を行う方法が有効である。

謝辞

本研究の一部には平成 14 年度東京情報大学共同研究 1 および東京情報大学学術フロンティアプロジェクト研究費の補助を受けた。

参考文献

- [1] 西村明, 小泉宣夫, “AD/DA 変換器におけるサンプリング・ジッターの測定,” 日本音響学会講演論文集, 秋, 659-660 (2001).

- [2] 加藤充美, 西村明, 安藤由典, “解析信号を用いたフルート音の倍音の周波数分析,” 電子情報通信学会技術研究報告, SP2000-136, 43-50 (2001).

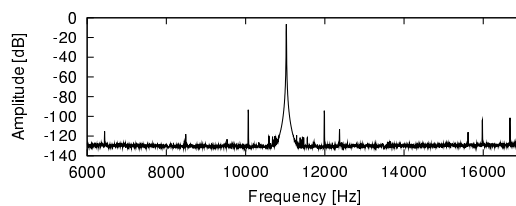


Fig. 1. Power spectrum of 11025Hz signal.

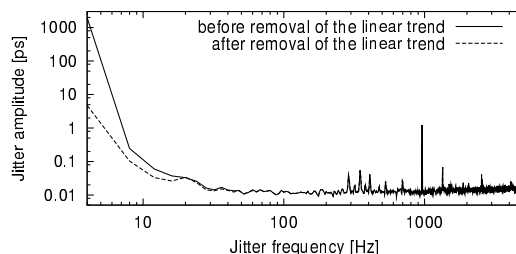


Fig. 2. Jitter spectrum of 11025Hz signal.

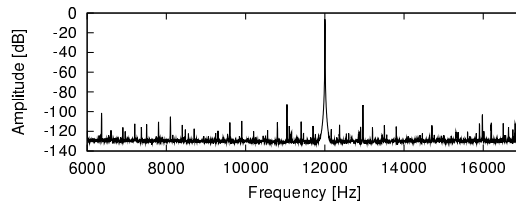


Fig. 3. Power spectrum of 12kHz signal.

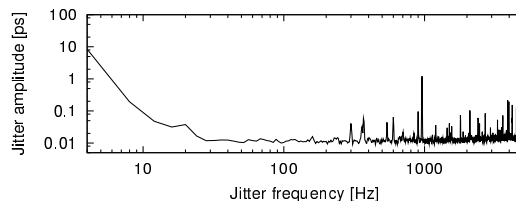


Fig. 4. Jitter spectrum of 12kHz signal.

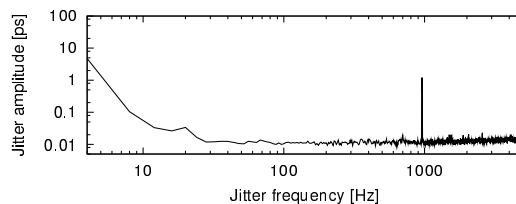


Fig. 5. Common jitter spectrum.

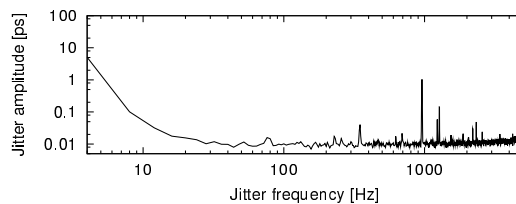


Fig. 6. Jitter spectrum of 14.7kHz signal.