

AD/DA 変換器における音楽信号を用いたサンプリング・ジッターの測定*

○ 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。

この測定方法では、純音信号を DA 変換し、すぐさま AD 変換することによって、双方の変換器特性の重畳された観測音波形を得て、これをデジタル領域にて分析する。しかし、オーディオ CD プレーヤのように回転系と電子系が混在するオーディオ機器では、CD 盤からの信号読取とその制御、さらに音響信号の復元や再生の過程において、CD 盤に記録されている音楽信号と何らかの相関をもったジッターが生じており、そのようなジッターは純音のような単純な測定信号を用いる限り測定できないのではないかと、という懸念も存在する。

そこで本報告では、音楽信号を測定信号として、DA/AD 変換時に生じるサンプリング・ジッターを推定する手法を提案し、コンピュータシミュレーションと実測によってその有効性を検証する。

2. 解析信号を用いたサンプリング・ジッター測定

2.1 純音信号を測定信号とする場合

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の波形と、振幅変動の波形を同時に求めることができる [1]。

2.2 音楽信号を測定信号とする場合

測定信号に音楽信号を用いる場合は、式 1 および 2 において、 ω_c を時間の関数である瞬時角周波数 $\omega_c(t)$ と置くことに等しい。測定信号の解析信号における位相角を $\phi_1(t)$ とすると、 $\omega_c(t) = \frac{d}{dt} \phi_1(t)$ である。そして、観測信号の解析信号における位相角を $\phi_2(t)$ とすると、理論的にジッター波形は、 $J \sin(\omega_m t) = (\phi_2(t) - \phi_1(t)) / \omega_c(t)$ として求まる。しかし、実際には複数音の混合した音楽信号の位相は不連続であるため、 $\omega_c(t)$ は $-\pi fs \sim \pi fs$ の範囲を取り、その除算によって正しいジッター波形は得られない。

このため、測定信号と観測信号に同一の直線位相帯域通過フィルタを通した後、それぞれの $\phi_1(t)$ と $\phi_2(t)$ を求め、 $\omega_c(t)$ の代わりに帯域周波数を代表する中心周波数で除算することによって、ジッター波形を推定することを提案する。本報告では、帯域通過フィルタの帯域は 0Hz から 4kHz づつ重なりを持たないように設定した。

実際の測定では、DA と AD 変換器のサンプリングクロック間に定常的なずれ (0.01% 前後) が存在し、かつサンプリング間隔にも位相ずれが生じる。これらのずれは、測定音と観測音との正確な位相比較を不可能にする。このため、測定音の前後に純音信号を挿入しておき、観測音で得られる純音信号の時間間隔と位相角を用いて、時間長差とサンプリング位相ずれを精密に測定する。そして、その位相ずれを補正する直線位相フィルタと、サンプリング周波数変換による時間長補正によって、測定音と観測音との時間軸を高精度に一致させる前処理が必須になる。

* Measurement of sampling jitter in AD/DA converters using musical signal

3. 測定のコピュータ・シミュレーション

測定信号には、音楽 CD からデジタルデータとして読み取った R チャンネル 262144 点の音楽信号を用いた。ジッターによって生じる音楽信号成分の側帯波が量子化ノイズや測定系に生じる雑音レベル以下になるような条件下での測定は不可能であるため、音楽信号は十分な振幅を持つ必要がある。また高周波信号ほど前述の側帯波振幅が大きくなるため、高周波数成分を多く含む音楽信号を採用した。ここで用いた音楽信号の平均スペクトルを Fig.1 に示した。

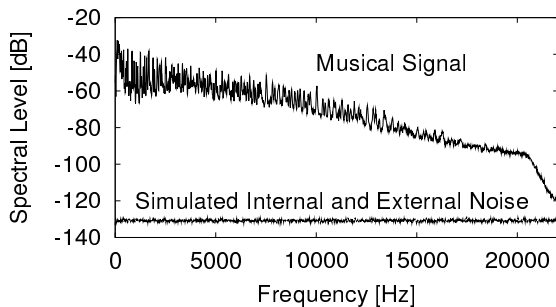


Fig. 1. Average spectral level of the musical signal and simulated internal and external noise.

実際の測定環境を模擬するために、音楽信号にジッター (100Hz~1010Hz, 5成分) を与え [3]、0.01%未満のサンプリング周波数変換を施してそのずれを模擬した。これに内部/外部雑音を模擬するランダムガウス雑音 (-120, -130, $-\infty$ dB/Hz) を付加した後、16bit 量子化を行った波形を観測信号とし、与えられたジッター振幅の推定を行った。以降は最も有効にジッター波を抽出できた 4~8kHz 帯域の測定結果を示す。

測定されたジッタースペクトルの例を Fig.2 に示した。この図の 10Hz 以下の成分は、サンプリング位相ずれ補正において生じる誤差に起因している。推定されるジッター成分振幅は、付加する雑音波形によって若干異なるため測定を 50 回繰り返した。Fig.3 にジッター成分振幅 3.16ns, 10ns のときの推定値の平均値を示した。それらの標準偏差は Fig.3 におけるデータプロット点の幅より小さい。ジッター振幅 3.16ns では、ノイズ付加時の測定は不可能だった。これらの結果より、ジッター周波数が高いほど、ジッターによって生じる側帯波が通過帯域の外に洩れやすいため、振幅値を過小推定していることが分かる。そして、今回用いた音楽信号では振幅 10ns 程度の

ジッターの存在を観測可能であることが分かった。

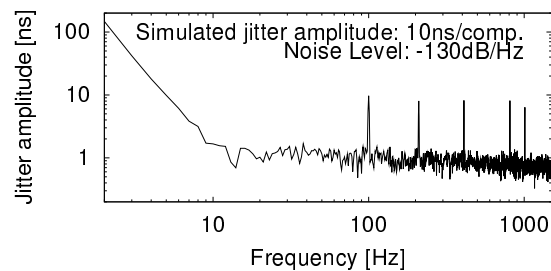


Fig. 2. Jitter spectrum obtained from the measurement of the simulated condition.

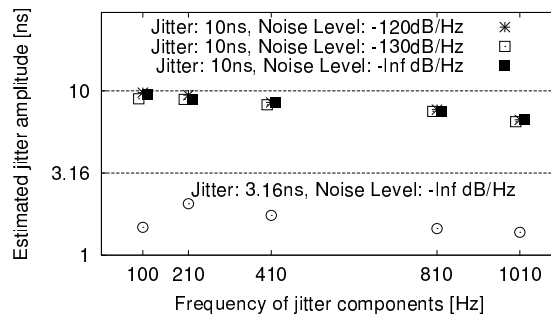


Fig. 3. Average of estimated jitter amplitude.

4. 実測結果

前報 [1] と同じ機材を用いて、コンピュータ接続の DA 変換器および、測定信号を記録した CD-R メディアを再生する複数の CD プレーヤとその内蔵 DA 変換器について、前報と同じ純音信号、および前節の音楽信号を用いた測定を行った。

その結果、純音信号では、すべての DA 変換器において振幅 5ns を越えるジッター成分は観測されず、音楽信号では、推定可能振幅に達するジッター成分は観測されなかった。よって、今回用いた音楽信号や測定対象機器の範囲では、振幅 10ns を越えるようなジッター成分は、生成されていないことが分かった。

謝辞

本研究の一部には平成 13 年度東京情報大学共同研究 4 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).
- [3] 桐生昭吾, 蘆原郁, 吉川昭吉郎, 沢口真生, “ソフトウェアシミュレータによる PCM 音楽信号における時間ゆらぎによる歪の検知限の測定,” 電子情報通信学会技術研究報告, HDA01-20, 15-19 (2001).