

音楽信号を用いたサンプリング・ジッターの測定手法

西村 明[†] 小泉 宣夫^{††}

[†] 東京情報大学 総合情報学部 情報文化学科

〒 265-8501 千葉県若葉区谷当町 1200-2

TEL 043-236-4658, akira@rsch.tuis.ac.jp

^{††} 東京情報大学 総合情報学部 情報システム学科

nkoizumi@rsch.tuis.ac.jp

あらまし 純音を測定信号とし、DA変換器とAD変換器を通した測定系で得られる観測信号の解析信号より、時間領域においてサンプリング・ジッターと振幅変動を分離して求める手法を、既に示した。しかし純音を用いた測定では、音楽信号を再生/録音する際に生じるかもしれないジッターを評価できない恐れがある。そこで本報告では、音楽信号を用いて測定系に生じるジッター波を推定する手法を提案する。測定のコピュータ・シミュレーションより、振幅が3ns程度のジッターであれば推定可能であることが分かった。また、音楽信号を用いて実際のAD/DA変換器を用いたジッターの測定を行った結果、推定可能な振幅に達するジッター波は存在していないことが分かった。

キーワード 解析信号、時間領域、周波数領域、側帯波、位相、フィルタ

Measurement of sampling jitter using musical signal

Akira NISHIMURA[†] and Nobuo KOIZUMI^{††}

[†] Department of Media and Cultural Studies, Faculty of Informatics,

Tokyo University of Information Sciences

1200-1, Yatoh-cho, Wakaba-ku, Chiba-city, Chiba 265-8501, Japan

TEL +81-43-236-4658, akira@rsch.tuis.ac.jp

^{††} Department of Informatin systems, Faculty of Informatics,

Tokyo University of Information Sciences

nkoizumi@rsch.tuis.ac.jp

Abstract We had proposed a method of sampling jitter measurement which was able to separate sampling jitter from amplitude fluctuation in time-domain. In the measurement, a pure tone was reproduce from a DA converter and recorded by an AD converter. Such measurement, however, may not properly estimate specific sampling jitter possibly generated by reproducing musical signals. Therefore, we propose a new method to estimate sampling jitter using a musical signal as a signal for measurement. Computer simulations of the measurement reveal that the smallest estimated jitter amplitude is about 10 ns. Actual measurements of sampling jitter in AD and DA converters show that there is no jitter components which are able to be estimated using a musical signal.

Key words analytic signal, time-domain, frequency-domain, sideband, phase, filter

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、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。そしてそれが、従来から知られている、観測音のパワースペクトルよりジッターを推定する周波数領域に

おける測定方法[2]と比較して、測定精度が高くかつ様々な面で優れていることを示した。

この時間領域における測定方法では、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。そして、実際にジッターが音質に悪影響を及ぼすことが問題になるのは、一般的に音楽信号の録音あるいは再生時である。

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. 純音信号を測定信号とするサンプリング・ジッター測定

2.1 解析信号を用いた時間領域での測定

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 $x(t)$ は式 (1) のように表される。

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

$x(t)$ の解析信号 $y(t)$ は、 $x(t)$ をヒルベルト変換して得られる信号を $H[x(t)]$ として、

$$y(t) = x(t) + jH[x(t)] \quad (2)$$

と表される。 $y(t)$ は複素信号であるから、各時刻の振幅絶対値 (振幅変動波) $a(t) = \sqrt{x(t)^2 + H[x(t)]^2}$ と瞬時位相角 $\phi(t) = \arctan(H[x(t)]/x(t))$ を用いて、

$$y(t) = a(t) \exp(j\phi(t)) \quad (3)$$

と表すことができる。ここで、式 (2) に式 (1) を代入し、ヒルベルト変換が 90 度位相変換であること ($H[\sin(\theta)] = \cos(\theta)$, $H[\cos(\theta)] = \sin(\theta)$) を利用してこれを解くと、

$$y(t) = a(t) \exp(j(\omega_c(t + J \sin(\omega_m t)) - \pi/2)) \quad (4)$$

が得られる [3]。よって、ジッター波形は、

$$J \sin(\omega_m t) = (\phi(t) + \pi/2)/\omega_c - t \quad (5)$$

となる。実際の測定では、解析信号 $y(t)$ は $x(t)$ の DFT から求めることができる [3] ので、その瞬時位相角 $\phi(t)$ と、それを時間微分して得られる瞬時角周波数を時間平均した搬送角周波数 ω_c より、測定系において生じるジッターの波形を求めることができる。また、振幅変動波形は、解析信号の絶対値を計算することによって求めることができる [1]。

ここでは単純化の為にジッター波形を正弦波で表したが、理論的には、搬送波周波数と、AD 変換におけるナイキスト周波数あるいはゼロ周波数との差を最高周波数とするジッター波形を抽出することが可能である。

2.2 周波数領域での測定

式 (1) を微小角における三角関数の近似を用いて展開すると、

$$x(t) = a(t) \left(\sin(\omega_c t) + \frac{A\omega_c}{2} (\sin((\omega_c + \omega_m)t) - \sin((\omega_c - \omega_m)t)) \right) \quad (6)$$

となる。よって、信号周波数からジッター角周波数 ω_m だけ離れた側帯波が、信号振幅に対して、 $A\omega_c/2$ の振幅で生じることが分かる。この側帯波の振幅を周波数領域で測定し、そこからジッター振幅 A を推定するのが、周波数領域におけるジッター測定である [4]。

3. 音楽信号を測定信号とした時間領域での測定

音楽信号を測定信号とする場合、ジッターによって生じる信号音の側帯波成分は、他の音楽信号スペクトルに埋もれてしまうため、周波数領域でのジッター測定は不可能である。

これに対して、解析信号を用いた時間領域のジッター測定を応用すれば、測定信号と観測信号との位相比較を行うことによってジッター測定が可能である。ただし、2つの信号の位相を精密に比較するためには、様々な障害が存在する。本節では、それらの障害を解決する測定法を示す。

3.1 理論的背景

測定信号に音楽信号を用いる場合は、式 (1) および (4) 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瞬時位相角を $\phi_1(t)$ 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瞬時位相角を $\phi_2(t)$ とすると、理論的に、測定系に生じるジッター波は、 $\phi_1(t)$ を式 (5) の右辺 $\phi(t)$ に代入して得られる測定信号の位相ゆらぎと、同じく $\phi_2(t)$ を式 (5) に代入して得られる観測信号の位相ゆらぎの差分、

$$J \sin(\omega_m t) = (\phi_2(t) - \phi_1(t))/\omega_c(t) \quad (7)$$

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 $-\pi f_s \sim \pi f_s$ (f_s はサンプリング周波数) 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。

3.2 帯域制限

このため、測定信号と観測信号を同一の直線位相帯域通過フィルタに通した後、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 (cf) 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。

このバンドパスフィルタの帯域幅を狭くするほど、帯域中心周波数と、帯域内に存在する成分音周波数は近くなるため、除算におけるジッター振幅値の推定精度は高くなる。しかし、信号音成分と、ジッターによって信号音の両側に現れる2つの側帯波がひとつの帯域通過フィルタ内に存在しないと、ジッター振幅を過小評価してしまうことになる。そして、帯域幅を越える周波数のジッター成分を測定することはできない。よって、帯域幅を狭くすることは、測定できるジッター周波数範囲が狭

くなることに繋がる。

また、帯域の上限や下限付近に存在する成分の側帯波は、帯域外に洩れることになり、そのような成分に生じるジッターを見積もることはできない。加えて、位相差を帯域の中心周波数によって除算することによってジッター振幅が求められるため、帯域内の低域に強い信号音成分がある場合、その側帯波成分が帯域内に入っていたとしても、ジッター振幅は過小評価されてしまう。その逆に、帯域内の高域に強い信号音成分がある場合は、過大評価されてしまう。

よって、帯域制限を行ったとしても、一般的に帯域内スペクトル分布がめまぐるしく変化する音楽信号を用いた場合は、ジッター振幅の過大評価や過小評価は避けられず、それは分析対象となる音楽信号のスペクトルに依存していることが分かる。つまり、この手法によって得られるジッター振幅は、あくまで推定値、ということである。

しかしながら、その推定範囲の予測はある程度つき、例えば、2~6kHz 帯域において、2kHz 信号音に生じるジッター波の過小評価量は本来の値の 1/2 倍である。6kHz 信号音の場合は、過大評価量が 1.5 倍となり、実際のジッター振幅に対してこの範囲に推定値は収まることが分かる。また、高いジッター周波数成分ほど、その振幅は過小評価されることも予測できる。これら、音楽信号スペクトルやジッター周波数と、推定誤差との関係は、一定区間の信号の平均スペクトルと、同じ区間の平均ジッタースペクトルとの関係から定量的に導くことは可能だと思われるが、現時点では未着手である。

3.3 サンプリング位相ずれ、周波数ずれの測定

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(著者らの実測によると、約 0.03%以下)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 $f_s/4\text{Hz}$ の純音信号を挿入しておく。ここでは、その純音信号長は 20 周期 80 サンプルとした。そして、観測音において得られる音楽信号の前後にある純音信号の時間間隔と位相角の差を用いて、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遅延フィルタと、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を行う。図 1 に、サンプリング位相ずれとサンプリング周波数ずれの模式図を示した。また、図 2 に、測定全体の流れを示した。

3.4 サンプリング位相ずれ補正

遅れ時間 D サンプル (D は実数) の直線位相遅延 FIR フィルタ係数 $h(t)$ は、 k を整数、 T をサンプリング周期として、 $t = kT$ とおき、以下のように表される [5]。

$$h(t) = \frac{\sin(\pi(k - D/T))}{\pi(k - D/T)} \cdot w(t) \quad (8)$$

$w(t)$ は、窓関数である。 $h(t)$ は $t = 0$ 以前にも値をもち、 D の値が小さい場合には $t = 0$ 以前の切捨て誤差が大きくなる。このため、 D に固定遅延量 D_0 (係数長の半分) を付加して

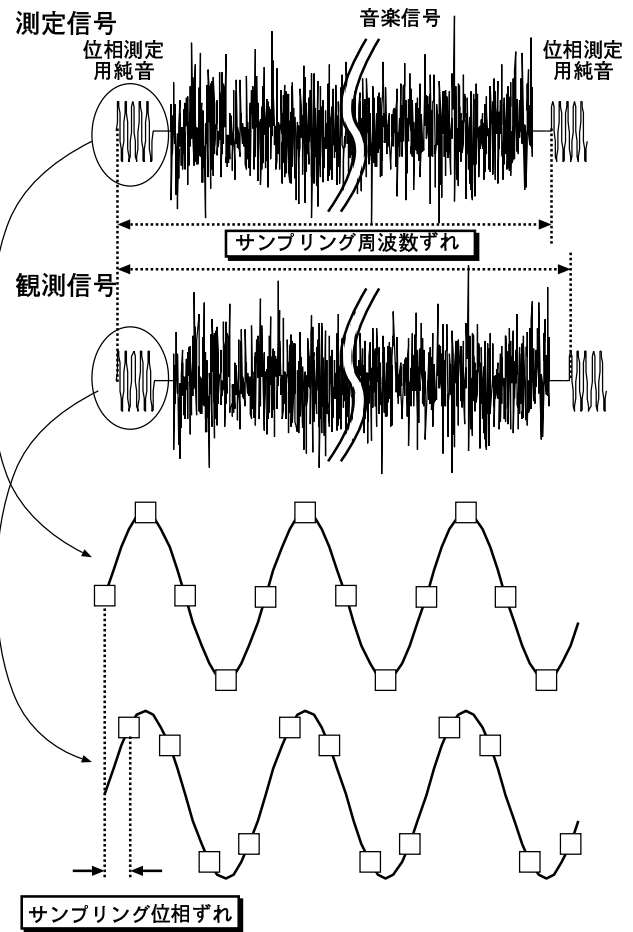


図 1 サンプリング位相ずれとサンプリング周波数ずれの概念図

$D = D_0 + d$, ($0 < d < 1$) という形にする。係数長は 2048 点として、無限のインパルス応答を打ちきることによる誤差を防ぐための窓関数には、位相歪みの小さくなる Hanning 窓を用いた。こうして作成した遅延フィルタの位相歪みは、実際の機器の位相歪みより 5 ケタ以上低い (12kHz 以下の帯域でほぼ 10ps 以下) のので、測定の誤差としては無視できる程度である。

3.5 サンプリング周波数ずれ補正

サンプリング周波数変換には DCT (離散コサイン変換) を用いた。測定信号時間長を n (n は自然数)、観測信号時間長を a (a は正の実数) とするとき、サンプリング周波数比 n/a の値に最も近い整数比 n_1/m_1 ($a_1 \leq m_1 \leq 2n$) を求める。そして、観測信号に対して、 m_1 点 DCT 後、 n_1 点逆 DCT を行ってサンプリング周波数変換された時間波形を求める。このとき、 $m_1 < n_1$ の場合は、DCT 後のスペクトルに、長さ $n_1 - m_1$ のゼロ点を加えたスペクトルについて、逆 DCT を行った。

実際の音楽信号に対して、0.01%未満のサンプリング周波数変換を行い、再び同じ率だけサンプリング周波数を戻すことによって得られる時間波形と、元の時間波形との残差は -270dB 以下であることから、このサンプリング周波数変換によって生じる誤差は無視できると言える。

4. 測定のコンピュータ・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

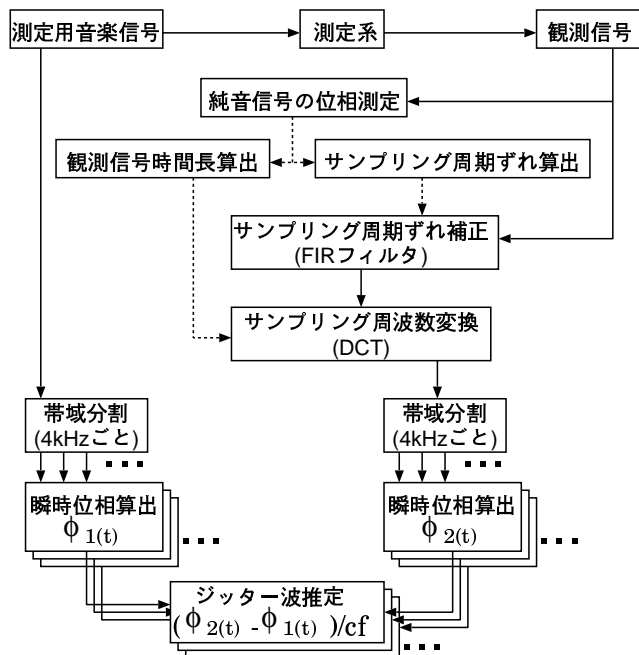


図 2 測定のプロックダイアグラム

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図 3 に示した。

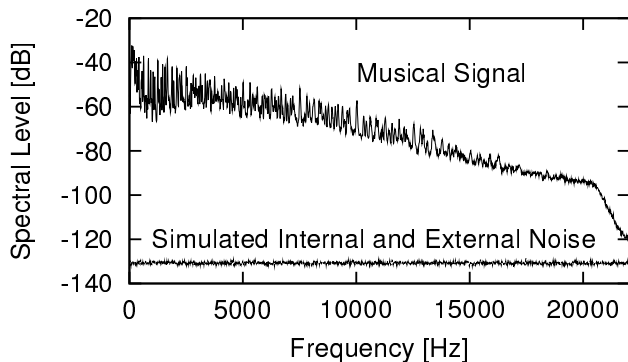


図 3 音楽信号の平均レベルと模擬した内部/外部雑音のスペクトルレベル

実際の測定環境を模擬するために、音楽信号にジッター (100, 210, 410, 810, 1010Hz の等振幅 5 成分) をソフトウェアシミュレーション [6] によって与え、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。ここでの帯域分割は、通過フィルタの帯域を 0Hz から 4kHz づつ重なりを持たないように設定した。以降は最も有効にジッター波を抽出できた 4~8kHz 帯域

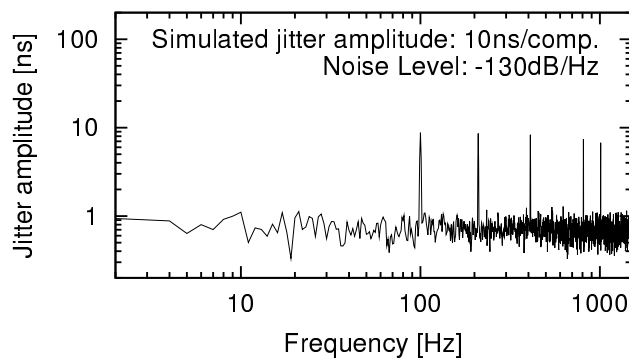


図 4 測定シミュレーションによって求められたジッタースペクトル

のシミュレーション結果を示す。

成分あたり振幅 10ns のジッター波を付加した音楽信号から計算されたジッタースペクトルの例を図 4 に示した。

このようにして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。図 5 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図 5 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、ここで用いた音楽信号による測定では、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。

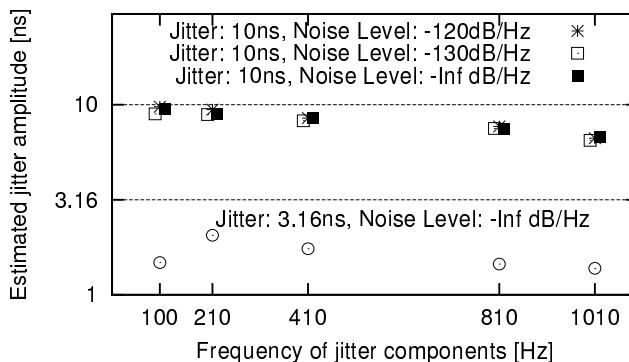


図 5 シミュレーションで求められた平均ジッター振幅

5. 実測結果

5.1 測定条件

測定用信号は、12kHz、5 秒間の純音および、前節までのコンピュータ・シミュレーションで用いたものとは異なる約 5.9 秒間の音楽信号を、CD-R メディアにオーディオトラックとして記録して用いた。CD-R 記録はコンピュータ接続の CD-R ドライブを用いて、4 倍速、ディスクアットワンスにて行った。CD-R メディア記録層の素材はシアニンのものを用いた。

実測において用いた音楽信号は、RWC 研究用音楽データベース (ポピュラー音楽) RWC-MDB-P-2001 No.2 [7] の冒頭約 9.6 秒から 15.5 秒までの 5.9 秒間の L-channel 信号であった。これを用いた理由は、前節のシミュレーションで用いた音楽信号より高域のエネルギーが強いため、より小さいジッター振幅の推定が可能であると見込まれるためである。図 6 にその平均スペクトルを示した。

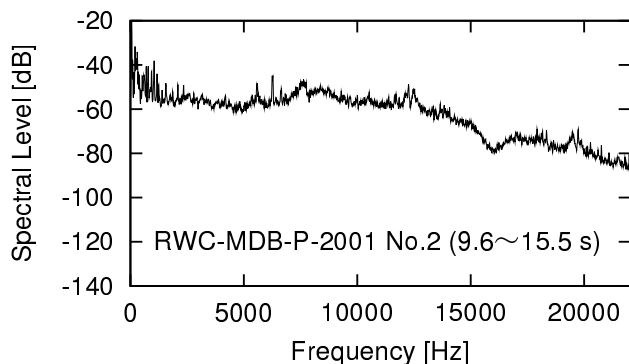


図 6 RWC-MDB-P-2001 No.2 の平均スペクトル

実際に、既知の振幅 (20, 55, 100, 210, 410, 810, 1010Hz の 7 成分 3.16ns 等振幅) のジッター波を付加した音楽信号を測定対象として、前節と同様なシミュレーションを行った。2~6kHz 帯域で得られた結果を、図 7 に示した。この結果から、この音楽信号を用いると、3 ns 程度のジッター振幅まで検出できることが確認できた。そして、ジッター振幅の推定値は音楽信号スペクトルに依存するため、この音楽信号を用いた測定では、ジッター振幅値は過大評価されることが分かった。

CD-R メディアに与える外乱や、信号の盤面上記録位置などによって、ジッターの量が変化するという考えもある。そのため予備的に、CD-R メディアのレーベル面半径方法に $4 \times 1\text{cm}$ のガムテープを張り付けた場合とそうでない場合、ディスク外周付近と内周付近に信号を記録した場合、ディスク中心空隙部の円周の一部を 2mm ほど広げた場合のジッター測定を行った。その結果、それらの要因によるジッター量およびジッタースペクトルの変化は、純音、音楽信号いずれを用いた測定でも、ほとんどないことが分かった。

実際に、純音による測定によって、得られるジッター量やそのスペクトルが変わるのは、CD プレーヤーおよび DA 変換器を変更した場合であった。著者らが所有する複数の CD プレーヤーおよび DA 変換器を用いた測定結果については現在データ処理中であり、その詳細な報告は、次回に譲りたい。現在までのところ、推定可能振幅 (約 3 ns) に達する純音性のジッター成分は観測されていない。

5.2 ジッター付加音楽信号を用いたジッター検出

ここでは、既知の振幅 (20, 55, 100, 210, 410, 810, 1010Hz の 7 成分 3.16ns 等振幅) のジッター波を付加した音楽信号を測定信号として、実際の測定系を通した測定を行った場合に、その付加したジッターが検出できるのかどうかの確認を行った。CD-R に記録されたジッター付加音楽信号を、CD プレーヤーか

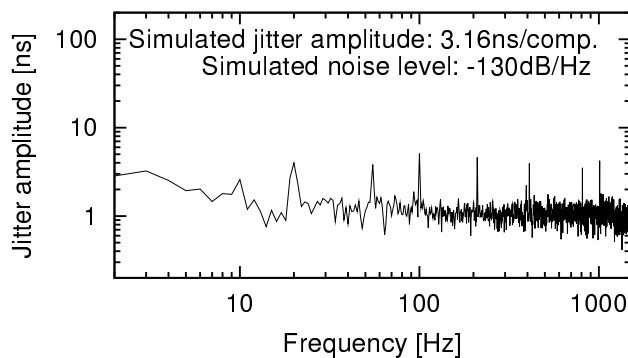


図 7 成分あたり振幅 3.16ns のジッター波を付加した音楽信号からのジッター検出結果 (シミュレーション)

ら再生して、AD 変換器により録音し、分析を行った。

結果のジッタースペクトル (図 8) からは、付加した振幅 3.16ns のジッターがやや過大評価されていることが分かる。この結果はシミュレーションによる結果 (図 7) とほぼ同じであった。よって、振幅 3 ns 程度のジッターがもし測定系に含まれていれば、検出できることを、実際の測定系においても確認できた。さらに、図 8 と 7 を比較すると、実測である前者の方が、ややノイズフロアが高いが、あらかじめ付加したジッター波以外の周波数において、顕著なジッター成分は認められない。このことから、測定系には検知可能なジッターは存在しないことが明らかになった。唯一 10Hz 付近に小さいピークが見られるが、これは両図で共通しており、測定によって生じるアーチファクトの可能性もあるので、今後検討が必要である。

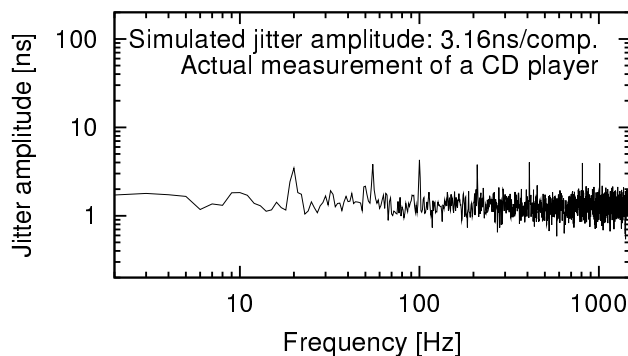


図 8 成分あたり振幅 3.16ns のジッター波を付加した音楽信号からのジッター検出結果 (実測)

6. 考 察

6.1 音楽信号を用いたジッター測定精度の向上

ここでは、本稿で示した、音楽信号を用いたジッター測定手法において、測定精度を向上させる可能性を示す。

測定結果に誤差を生じさせる可能性のある物理条件として、

- (1) 音楽信号スペクトル
- (2) AD および DA 変換器の位相特性
- (3) 位相測定用純音を用いた位相測定時の誤差

が挙げられる。(1) については、帯域分割後の音楽信号の時

間平均スペクトルを加味した周波数で、その帯域の周波数を代表させる方法が考えられる。

(2)については、測定系に位相歪みがあると、ジッターによって生じる側帯波の位相が変わってしまい、ジッター量を過小評価あるいは過大評価してしまう、という問題である。つまり、式(6)において、ジッターによって生じる側帯波の位相は、信号音の位相に対して、周波数の高い側でゼロ、低い側で π となっている。もし測定系の位相歪みによって、この位相関係が崩れると、側帯波の位相が高い方で $-\pi/2$ 、低い方で $\pi/2$ である振幅変動成分と、周波数変動成分とが合成されたものとして分析され、ジッター振幅は過小評価される。この逆に、測定系に生じている振幅変動成分が、測定系の位相歪みによって周波数変動成分との合成として分析され、ジッター成分が過大評価されることもありうる。この解決のためには、TSP信号などを用いて測定系の伝達関数を測定し、逆フィルタによって、伝達特性における位相特性の補正する方法が考えられる。

(3)の誤差を減少させることは、サンプリング周波数比測定の精度を上げることにつながる。サンプリング周波数比の誤差は、各信号周波数において、測定されたジッター波に1次のトレンド成分、つまり測定区間長が1波長となるような鋸歯状波が加算されることになる。このトレンド成分の振幅は、信号周波数に比例するため、サンプリング周波数比誤差が大きく、かつ観測周波数帯域が高い場合には、ジッターの低域スペクトルにトレンド成分が現れる。

(3)の誤差を減少させるためには、現在 $f_s/4\text{Hz}$ の位相測定用純音を、より位相測定に適した信号に変えてやるのが考えられる。ただし現時点では、そのような測定信号として妥当なものは、明らかでない。あるいは、位相測定用純音の間隔をより広げることによって、サンプリング周波数変換の誤差の影響が、観測信号において少なくなるようにする方法が考えられる。ただしこれは、より長い区間のDCTが要求され、計算時間が爆発しないためには、計算効率の良いアルゴリズムの使用が望まれる。または、十分に精度のよい他のサンプリング周波数変換方式の採用も考えられる。

6.2 ジッターによる聴感への影響

サンプリング・ジッターが生じることによる聴感への影響はジッター周波数によって大きく2種類に分けられる。サンプリング・ジッターは、信号音からジッター周波数だけ離れた側帯波として現われる。この側帯波が分離して聴こえる程度にジッター周波数が高い場合(およそ臨界帯域幅以上)と、ジッター周波数が非常に低く(およそ20Hz以下)、信号音が周波数変動音として聴取できる場合である。

ジッター周波数が高い場合、ジッターによる側帯波のレベルが高いとき、純音成分として信号音と分離して聴取が可能である。これは信号音によるマスキングが少ない低域側の側帯波について顕著である。今ここで、信号音によるマスキングの影響を全く考えないと仮定して、信号音を聴取限界である120dB SPLで再生したときに、ジッターに起因する側帯波成分が最小可聴閾を越えるときに、ジッターの影響が聴取できるとすると、信号音周波数の関数として、最小可聴閾のデータより、ジッター

許容限界を容易に求めることができる[4]。

例えば、16kHzの信号音に対して、ジッター周波数14kHzの場合、側帯波は人間の聴力の最も敏感な2kHzに現れる。ここで、信号音に対して、-120dBの側帯波が聴取可能だとすると、このときのジッター振幅は約20psである。これはかなり極端な例であり、実際の音楽聴取条件ではありえないであろう。しかし、ハイサンプリングの音記録においては、20kHz以上の帯域は基本的に聴こえないため、強い信号が記録されている場合もありうる。そのような信号が存在し、かつ、高い周波数のジッター成分が存在すると、可聴帯域に側帯波を生じる。よって、ジッター周波数が高い成分にも注意を払う必要があるだろう。

ジッター周波数が信号音を中心とする臨界帯域幅より小さくかつ、20Hz程度より大きい場合は、側帯波は信号音によるマスキングを顕著に受け、側帯波を信号音から分離して聴取することは困難となる。よって、このジッター周波数がこの範囲である場合に、最もジッターの存在は聴感上目立たないと言える。

ジッター周波数がおおよそ20Hz以下では、信号音の高さの揺らぎを感じやすくなる。このような信号音の周波数変動に対して、最も人間の感度がよいのは、3Hz付近である[8]。ワウ・フラッターを算出するための聴感補正フィルタは、そのような人間の周波数変動検知特性を反映するため、4Hzを0dBとして-6dB帯域幅が0.8Hz~20Hzであるようなフィルタが用いられている。

Sakai [8]によれば周波数変動のピーク幅の検知限は、1000Hzの複合音(スペクトルは不明)に正弦波状変調を加えた場合、 $0.067 \pm 0.03\%$ である。5000Hzの複合音の場合、おなじく $0.062 \pm 0.03\%$ であり、これをジッター振幅になおすと、約4~10nsである。これまで行った、純音信号を用いたDAおよびAD変換器のジッター測定では、ジッター波形の平均値を差し引くことによって直流(定常的サンプリング周波数差)分を除去して求めたジッター波形のスペクトルにおいて、最も振幅が大きい1Hz以下では、4nsに近いジッター振幅が観測されたものもある。ただし、3Hz付近では、その1/10以下のジッター振幅であった。もっとも、3Hz付近の測定値には、周波数分析の際の、より低いジッター成分によって生じる窓関数のメインローブの影響もあるため、より長い測定信号と、より長い窓関数を用いたジッター波の周波数分析も必要であろう。

6.3 今後の課題

測定系のAD変換器のサンプリング周波数が48kHzの時、解析信号を用いたジッター測定では、信号音として用いる純音周波数12kHzの時に測定可能ジッター周波数は最大である12kHzとなる。よって、前節で例として挙げた、16kHzの信号音を含むジッター周波数が14kHzとなる成分は測定できない。この測定を可能にするには、少なくとも信号音周波数の4倍以上のサンプリング周波数をもつAD変換器が必要となる。このようなハイサンプリングのAD変換器を用いたDA変換器を対象とするジッター測定を、今後行う予定である。なお、このような高いジッター周波数成分を、今回提案した帯域分割を行う音楽信号を用いたジッター測定より求めることは、帯域幅をかなり広くとる必要があり、困難であると言える。

また、本稿で提案した音楽信号を用いたジッター測定は、ジッターが存在していればその振幅の推定が可能であることは分かったが、測定の誤差につながる要因もいくつか存在するため、これらを改善していくことも望まれる。

7. ま と め

純音を用いたサンプリング・ジッター測定では、音楽信号を再生/録音する際に生じるかもしれないジッターを評価できない恐れがある。このため、音楽信号を用いて測定系に生じるジッター波を推定する手法を提案した。実際の測定では測定信号の瞬時位相と観測信号の瞬時位相とを精密に比較するため、サンプリング周期ずれやサンプリング周波数ずれを精密に測定し、補正する必要があった。また、測定信号と観測信号の帯域制限を行う必要もあった。そして、測定のコンピュータ・シミュレーションより、振幅が3ns程度のジッターであれば推定可能であることが分かった。また、音楽信号を用いて実際のAD/DA変換器を用いたジッターの測定を行った結果、推定可能な振幅に達するジッター波は存在していないことが分かった。ただし、測定と分析はまだ継続して行っており、今後ジッター波が検出される可能性も否定できない。

謝辞

解析信号を用いた測定法について、くらしき作陽大学の加藤充美教授に有益なご議論を頂き、ここに感謝を表す。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の補助を受けた。

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] Julian Dunn, “Jitter Theory,” Audio Precision TECHNICAL NOTE, **23**, 1-23 (2000).
- [3] 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).
- [4] Julian Dunn, “Jitter: Specification and Assessment in Digital Audio Equipment,” Proceedings of the 93rd AES Convention, 1-23 (1992).
- [5] 大賀寿郎, 山崎芳男, 金田豊, 音響システムとデジタル処理(電子情報通信学会, 東京, 1995), pp. 215-216.
- [6] 蘆原郁, 桐生昭吾, “デジタルオーディオの時間ゆらぎによる音質変化シミュレーション,” 日本音響学会誌, **58**, 232-238 (2002).
- [7] 後藤真孝, 橋口博樹, 西村拓一, 岡隆一, “RWC研究用音楽データベース: ポピュラー音楽データベースと著作権切れ音楽データベース,” 日本音響学会講演論文集, **March**, 705-706 (2002).
- [8] Hisao Sakai, “Perceptibility of Wow and Flutter,” Journal of Audio Engineering Society, **18**, 290-298 (1970).