

デジタルオーディオ機器におけるサンプリング・ジッターについて

Sampling jitter observed in digital audio products

西村 明*, 小泉 宣夫**

Akira Nishimura, Nobuo Koizumi

* 東京情報大学 総合情報学部 情報文化学科

Department of Media and Cultural Studies, Faculty of Informatics,

Tokyo University of Information Sciences

** 東京情報大学 総合情報学部 情報システム学科

Department of Information Systems, Faculty of Informatics,

Tokyo University of Information Sciences

ABSTRACT

Results of jitter measurement for several kinds of digital audio products are introduced. Jitter measurement using analytic signals revealed that several factors, that is, a system of digital signal transmission, DAC, ADC and a clock generator, affect minute jitter characteristics of digital audio products. Throughout the jitter measurement, maximum amplitude of a jitter component was less than 2 ns above jitter frequency of 2 Hz.

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、録音や再生時にひずみをもたらす原因のひとつである。これまで我々は、解析信号を用いて、DA/AD 変換器に生じている周波数変動波 (ジッター波) 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¹⁾、測定誤差の要因について検討をした²⁾。さらにこれを、従来は困難であった音楽信号の録音再生時に生じるかもしれないジッターの測定法に拡張した³⁾。

本稿は、それらの測定法を用いて実測されたデジタルオーディオ機器のジッター特性を紹介し、考察を加えることを目的とする。

2 解析信号を用いるジッター測定法

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 $a(t)$ と、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⁴⁾。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、観測信号の 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のため、測定用信号の ω_c とは僅かに異なる。このため観測信号の ω_c は、観測信号の瞬時周波数を平均して求める。この手法は、測定系に存在する歪みや雑音成分の影響を受けるが、測定信号をサンプリング周波数の 1/4 である純音を用いると、それらの影響を少なくすることができる²⁾。

音楽信号を測定信号とする場合には、音楽信号の前後に挿入した短音の位相情報を用いて、観測信号と測定信号とのサンプリング周波数ずれおよび位相ずれを高精度に補正し、分析時に

双方の信号に帯域制限を行なった後で、それらの瞬時位相の比較を行う³⁾。

3 実測結果

ジッターの測定は、プレーヤにて CD-R に記録した信号音を読み取り、プレーヤ内蔵 DAC あるいはデジタル接続した DAC から再生したアナログ信号を、ADC で変換したデジタル信号に対して行った。測定時の接続を Fig.1 に示した。合計二十余りのデジタルオーディオ機器を組み合わせた結果得られたジッター特性の中から、特徴的な結果が得られたもののみ (Table 1 参照) を示す。なお、使用した ADC のジッタースペクトル振幅は 10Hz 以上で 80ps を下回る¹⁾。

測定の結果得られるジッター波形について、1 秒間の Hanning 窓掛け後に FFT を行い、これを 0.5 秒ずつずらして 5 秒間の平均スペクトルを求めた。測定系のノイズレベルが典型的な -130dBFS/Hz 程度である場合、純音信号を用いたジッター振幅検知限は数 ps $\sim$ 数 10 ps 程度である。音楽信号を用いた測定のジッター振幅検知限は 3 ns³⁾ であるが、それを越えるジッターは、音楽、純音いずれでも観測されなかったため、純音による測定結果のみを示す。全ての測定結果の再現性は高かった。

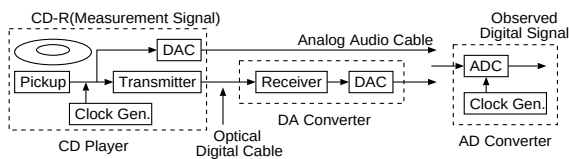


Fig. 1 Block diagram of measurement.

測定系におけるジッターの主な発生部所は、Fig.1 に示したように、クロック回路、デジタル信号伝送経路、AD/DA 変換回路であり、発生したジッターは積算されていく。よって、注目したい箇所の機器を入れ換えて測定を行うことによって、その機器に生じているであろうジッターの様相を調べることが可能となる。ここでは特に触れない限り、プレーヤと DAC の接続は、光ケーブルを用いた結果である。

Table 1 Specification and labeling of digital audio products for measurement.

label	specification	notes
CDP1	—	built-in DAC1
CDP2	Digital Servo Ratio Locked Loop	—
DVDA1	—	—
DAC1	22-Bit D.R.I.V.E. $32 \times$ oversampling	built-in DAC of CDP1
DAC2	20-Bit $\times$ 16/ch MMB $8 \times$ oversampling	—
ADC1	24-Bit $64 \times$ oversampling	PCI Audio Card
ADC2	16-Bit, $\Delta\Sigma$, $64 \times$ oversampling	SCSI-BOX

3.1 CD プレーヤと DA コンバータ

Fig.2 には CDP1 内蔵 DAC 再生時のジッタースペクトルを示した。CDP1 内蔵 DAC(DAC1) は外部デジタル入力の再生も可能であり、Fig.3 には、CDP2 の読み取ったデジタル信号を DAC1 にて再生時のジッタースペクトルを示した。Fig.4 は CDP3 の読み取ったデジタル信号を DAC1 に入力して再生した結果である。これらを比較すると、同じ DAC を用いてもクロック源が異なるとジッター特性に明らかな違いが存在することが分かる。

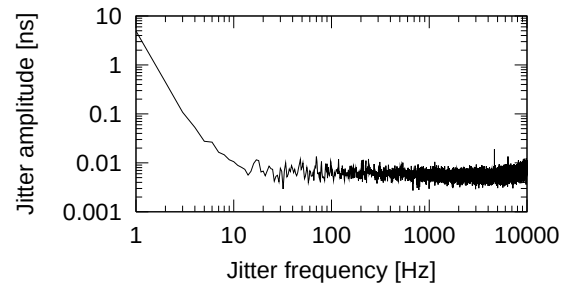


Fig. 2 Jitter spectrum of CDP1(DAC1).

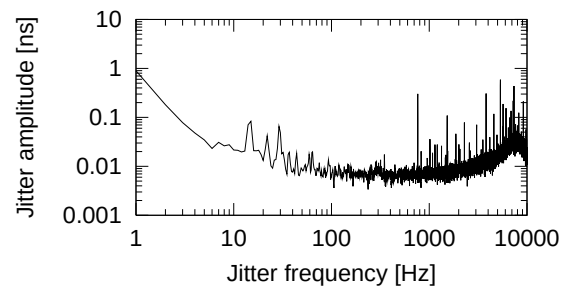


Fig. 3 Jitter spectrum of DAC1 connected to CDP2.

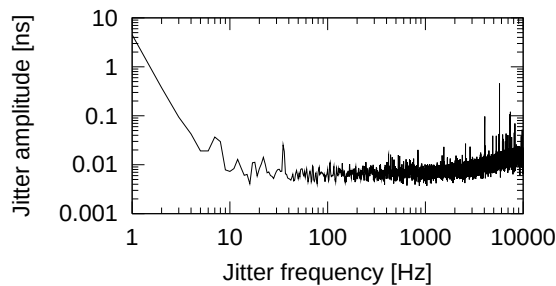


Fig. 4 Jitter spectrum of DAC1 connected to CDP3.

内蔵DACと外部DACを比較するため、Fig.5にはDVD-Audioプレーヤ(DVDA1)にて内蔵DACから再生した結果を、Fig.6にはDVDA1のデジタル出力を、DAC2にて再生した結果を示した。これらの比較より、DAC2は約200Hz以下のジッター成分を増幅し、それ以上のジッター成分を抑圧すると考えられる。

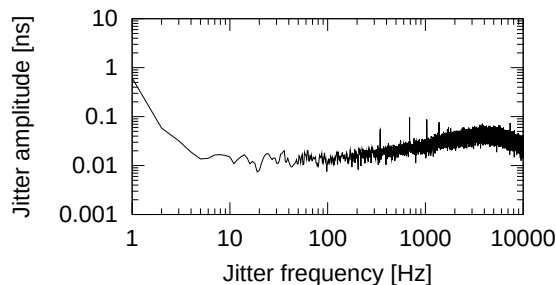


Fig. 5 Jitter spectrum of DVDA1.

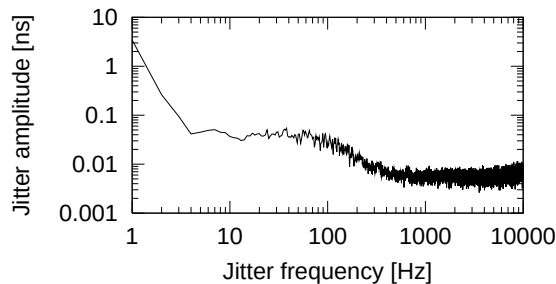


Fig. 6 Jitter spectrum of DAC2 connected to DVDA1.

3.2 デジタルケーブル

CDプレーヤとDACとの接続において、コンシューマ市場では同軸ケーブル(S/PDIF)と光ケーブル接続(TOS-Link)が一般的である。先に示したFig.3はCDP2とDAC1を光ケーブルで接続した場合の測定結果であり、それらを同軸ケーブルで接続した場合の測定結果であるFig.7と比較すると、ジッタースペクトルには

かなり違いが見られる。これは測定結果の中でも極端な例ではあるが、接続方式によってジッタースペクトルが変化する例は多かった。ただし、同軸デジタルケーブルについて、中級品と格安品の2種類を比較したところ、測定結果に違いは見られなかった。

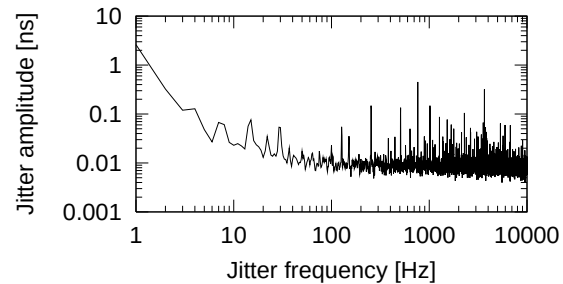


Fig. 7 Jitter spectrum of DAC1 connected to CDP2 via a coaxial digital cable.

3.3 メディア、機器への外的要因による影響

CDプレーヤの場合、メディア要因およびデータ読み取り部においてジッターが生じやすいと通説的には唱えられている。その一方で、今回行った、CD-Rメディア材質(フタロシアニン、シアニン)、メディアに与える傷、ガムテープ添付による偏重量などのメディア要因を制御した測定および、CD-Rの代わりにオーディオチェックCDの純音信号を用いた測定などによって、ジッター特性が変化することは無かった。

しかし、CDP1を内蔵DACを用いて再生した場合、ADC2にて測定を行った場合のみ、26Hzのジッター成分が現れた(Fig.8)。その際、同じADC2を用いて同時に測定した他のCDPおよびDACには、このジッター成分は認められなかったため、電源あるいはアナログ信号線を通じたADC2とCDP1との相互干渉などの外的要因による影響と考えられる。

3.4 DVDプレーヤ

DVDA1において、音声トラック(24bit,96kHz,2-ch)に純音信号が記録されたDVD-Videoディスクを再生して得られた測定結果をFig.9に示した。また、同じプレーヤにおいて、DVD-Audioフォーマット(24bit,96kHz,2-ch)にて記録を行ったDVD-R

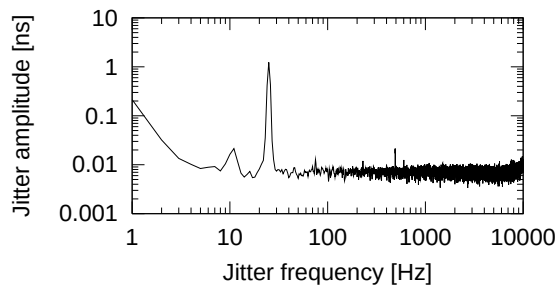


Fig. 8 Jitter spectrum of CDP1 recorded by ADC2.

ディスクを再生して得られた測定結果を Fig.10 に示した。これらと、Fig.5 に示した CD-R 再生時の測定結果を比較すると、3 者で明らかにジッタースペクトルが異なることが分かる。この違いの原因が、メディア、記録フォーマット、クロックのいずれであるか現時点では明らかでない。なお、これらの測定に共通して用いた ADC1 はサンプリング周波数 44.1kHz, 96kHz いずれにおいても、これらの測定結果に存在する特徴的なジッター成分を含んでいないことは確認できている。

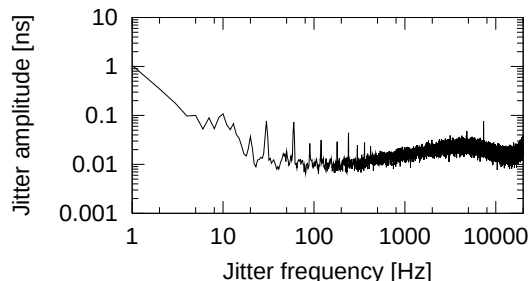


Fig. 9 Jitter spectrum of DVDA1 reproducing a DVD-Video (24bit, 96kHz) medium.

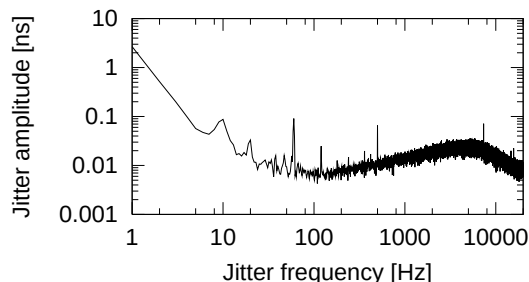


Fig. 10 Jitter spectrum of DVDA1 reproducing a DVD-R medium of DVD-Audio (24bit, 96kHz) format.

4 まとめ

今回測定したデジタルオーディオ機器のジッターは、ジッター成分周波数 2Hz 以上において振幅 2 ns 未満という、従来の聴覚特性の知見からは音質的には全く問題のない量⁵⁾であった。我々の提唱する解析信号を用いたジッター測定法は、一般のデジタルオーディオ機器を用いて、直接我々の耳に届く元となるアナログ信号に現れるジッターの影響を高精度に測定できることが特徴である。そして本報告では、機器による微細なジッター特性の違いの一例を明らかにした。機器の音質とジッター特性との関係を論ずる場合には、このようジッター測定は欠かせないであろう。

謝辞

本研究の一部には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) Akira Nishimura and Nobuo Koizumi, "Measurement of sampling jitter in analog-to-digital and digital-to-analog converters using analytic signals," Proceedings of the 112th Audio Engineering Society Convention, No. 5558, 1-6 (2002).
- 2) 西村明, 小泉宣夫, "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," 日本音響学会講演論文集, 秋, No. 3-P-25, 629-630 (2002).
- 3) Akira Nishimura and Nobuo Koizumi, "Measurement of Sampling Jitter using a Musical Signal," Proceedings of the 114th Audio Engineering Society Convention, No. 5797, 1-9 (2003).
- 4) 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).
- 5) 西村明, 小泉宣夫, "音楽信号を用いたサンプリング・ジッターの測定手法," 電子情報通信学会技術研究報告, **HDA2002-1**, 1-7 (2002).

Speaker's History:

Akira Nishimura graduated in Department of Acoustic Design from Kyushu Institute of Design in 1990. Since 1996, he is a faculty member at Tokyo University of Information Sciences.

E-mail: akira@rsch.tuis.ac.jp