

水晶振動子の微小な並列容量を容量デジタル・コンバータで測定してみる（中編）

$\Sigma \Delta$ ADC と CDC の同じところ・異なっているところ

著者：石井 聡

はじめに

前回書き出しで、「ちょっとした家庭菜園にハマっています」というお話をいたしました。妻はもともと花壇（花卉; かき）園芸をやっており、それに乗じてではありましたが、私は「食えるもの」という下卑な考えから始めた家庭菜園です。

その妻がある日、ハーブ（ミント）の苗を買ってきました。ひとつは「スペアミント」、もうひとつは「グレープフルーツミント」です。

購入したときはそれぞれ小さい苗でしたが、現在は図1、図2のようにかなり大きい株になりました（スペアミントは種からの育成もチャレンジしています）。これらの葉を使ってハーブ・ティーを楽しんでいますが、いくつか発見がありましたので、今回の出だしはこのお話をいたしましょう！

カフェで飲むハーブ・ティーより濃厚かつ香りが深い

これまでもカフェに入ると、時たまハーブ・ティーを頼んでいました。しかしどうも薄いというか、「こんなものか」という満足できない味と香りでした。ずっと「ハーブ・ティーとはこの程度のものか（『絞り出しが少ない』という意味で）」と思っていました。

しかし株から葉をちぎってすぐにティー・ポットに入れて熱いお湯を注いだ後、数分待つてから飲むハーブ・ティーの味は…、濃厚かつ、なんと香りが深いこと！これにはびっくりです。

カフェで飲むハーブ・ティーは、生産農場で収穫してから複雑な流通経路を経て店頭に着し、そこでも保管されることになるわけですから、それは鮮度が劣化してしまうだろうこと、考えれば気がつきます。いかに「新鮮」というものが大切かというところでしょうか。

ふたつのハーブで味と香りが異なる

つづいて感じたことが、スペアミントとグレープフルーツミントで味と香りが異なることです。相対的にはスペアミントのほうが香りが強くかつ良い香りなのですが、「尖った」感じがします。一方でグレープフルーツミントのほうの香りは若干弱い感じがして、また香り自体もなんとなく「草っぽい香り」的な感じがします。葉の形状も違いますから、当然、味や香りが異なるだろうことは想定できますよね。

もし一種類単独で飲むなら、私としてはスペアミントをお勧めしたいと思います。

ここで「スペアミントとグレープフルーツミントの葉をブレンドしてティー・ポットに入れてみる」と、それぞれのデメリットというか、スペアミントの尖った香りとグレープフルーツミントの「草っぽい香り」が相殺され、なんと！まろやかな味と香りに仕上がるのが分かりました！

以降はこの 3 種類の飲み方（個々とブレンド）でバリエーションを楽しみながらこれらの家庭ハーブと生活しています。

ネットで調べるとミントは生命力が強く、雑草も駆逐するほどの強靱さがあるそうです。種はホントに細かいので、種から発芽させての育成はちょっと手間がかかりますが、苗をホームセンターなどで購入して大きめの鉢に植え替えて育てていくと、ベランダなどでの育成も可能でしょう。ぜひご自身で育成してフレッシュなミントのハーブ・ティーをお楽しみいただければと思います。

そうそう、ベランダ育成などの場合の肥料は、[1]や[2]の液体肥料がお勧めです（私も使っています）。500～2000 倍に水で薄めて使用するものです。なお[1]は水耕栽培には適しませんので注意してください。他の植物も含めて水耕栽培をする場合は、[2]か[3]がお勧めです。[3]は粉末で、水に溶かして使います。



図 1. 大きく成長したスペアミントの株



図 2. これまた大きく成長したグレープフルーツミントの株

アナログ・デバイセズ株式会社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。
©2023 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Rev. 0

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-098

前回と今回は

さて、今回も、ここまでのマエフリと本題は全くもって関係ありません（笑）。前回（前編）も家庭菜園ネタということで、今回もそれに近い話題としてみました…。では今回も「閑話休題」ということで、本題に移っていきましょう。

前回と今回（そして残念ながら「次回」も…）の WEB ラボは「水晶振動子の微小な並列容量を測定してみたい」と思い立ったことから、そこで使用する IC の原理の紹介、実験などをしてみたお話しです。まず前回は容量デジタル・コンバータ (Capacitance to Digital Converter; CDC) の動作を理解する前段として、CDC の原理的動作と同じである $\Sigma \Delta$ ADC ($\Sigma \Delta$ AD コンバータ。 $\Sigma \Delta =$ シグマ・デルタ。以降は AD コンバータを ADC として表記します) の動作を説明しました。なおこの方式を「 $\Delta \Sigma$ 方式」と呼ぶ場合もありますが、アナログ・デバイセズでは「 $\Sigma \Delta$ 方式」と呼んでいます。実際はどちらも同じものです。前回は $\Sigma \Delta$ ADC の基本動作、とくに「ノイズ・シェーピング」について解説しました。 z 変換を用いてそのうごきを解析していくと、数式と実態とが非常に明確に関係づけられることが分かりました。

今回以降はこのノイズ・シェーピングの動作を実際に観測し、数式との関係を考え、CDC の動作原理について言及し、本題の CDC での水晶振動子の並列容量の測定を行っていきたいと思います。

ノイズ・シェーピング・スペクトル実験で使うみるボードと $\Sigma \Delta$ ADC

図 3 は P 板.com サイトでのサービス、「パネル de ボード」[4]の仕様で製作した、アナログ・デバイセズの絶縁型 $\Sigma \Delta$ 変調器 AD7401 によるノイズ・シェーピング特性観測基板 IEEC-CV001A です。ここでアナログ・デバイセズの AD7401 についてご紹介しておきましょう。

AD7401

<https://www.analog.com/jp/products/ad7401.html>

【概要】

AD7401 は、2 次の $\Sigma \Delta$ 変調器で、アナログ入力信号を高速の 1 ビット・データストリームに変換します。このデータストリームは、内蔵されたアナログ・デバイセズの iCoupler® 技術を用いてデジタル絶縁されます。AD7401 は、5V 電源で動作し、最大 $\pm 200\text{mV}$ ($\pm 320\text{mV}$ フルスケール) の差動入力信号に対応します。アナログ入力信号は、外付けのサンプル/ホールド (S/H) 回路の必要性を排除し、アナログ変調器によって連続的にサンプリングされます。入力信号の情報は、最大 20MHz のデータレートを持つ 1 ビット信号の密度として、出力のストリームに含まれます。オリジナルの情報は、適切なデジタル・フィルタによって、再構築することができます。シリアル I/O は、5V または 3V 電源 (V_{DD2}) のどちらでも使えます。

IEEC-CV001A のブロック図を図 4 に示します。図中には AD7401 自体の内部ブロックも示しています。AD7401 は $\Sigma \Delta$ 変調器側と AD 変換出力側（これまで出力 Y と示してきたもの）は、「デジタル・アイソレータ」というもので直流的に分離されています。このデジタル・アイソレータについては本技術ノートの議論の対象外なので、興味のある方は [5]などを参照してください。なおこの基板では同じグラウンド電位となるように、アイソレーションされたグラウンド端子間同士を相互に接続しています。

IEEC-CV001A ではノイズ・シェーピング動作を目視するため、 $\Sigma \Delta$ 変調器出力 (MDAT 出力。「出力 Y」と説明してきたもの) を、デジタル・フィルタによる LPF 処理を行わず、コンデンサと抵抗による RC アナログ LPF でフィルタリングをするという方法をとっています。これにより $\Sigma \Delta$ 変調器によるノイズ・シェーピングと、それをフィルタリングして SNR (Signal to Noise Ratio; SN 比) を向上させる振る舞いを目視で確認できます。

実際に波形を見てみる（波形はランダムに見える）

図 5 は AD7401 の MDAT 出力 (1 ビット・データ出力) をそのままオシロスコープで見たようすです。基板上で入力電圧の 1V が 1/10 に分圧されていますので、AD7401 の入力端子 V_{IN+} , V_{IN-} の端子間電圧は $+100\text{mV}$ になります。出力波形は同図のように、 $\Sigma \Delta$ 変調によりランダム的な H/L になっており、何ら情報を持っていないように見えます。これは前回示したように、 $\Sigma \Delta$ 変調器での 1 回のサンプリングで得られた 1 ビット・データ (MDAT 出力) はほとんど意味を持たないからです。

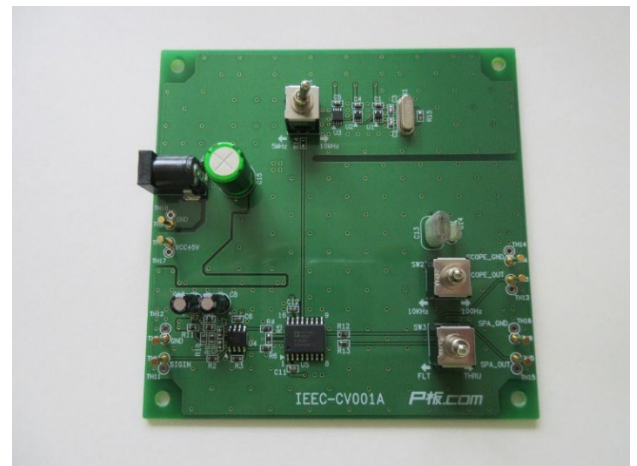


図 3. パネル de ボード [4] の仕様で製作したノイズ・シェーピング特性観測基板 IEEC-CV001A

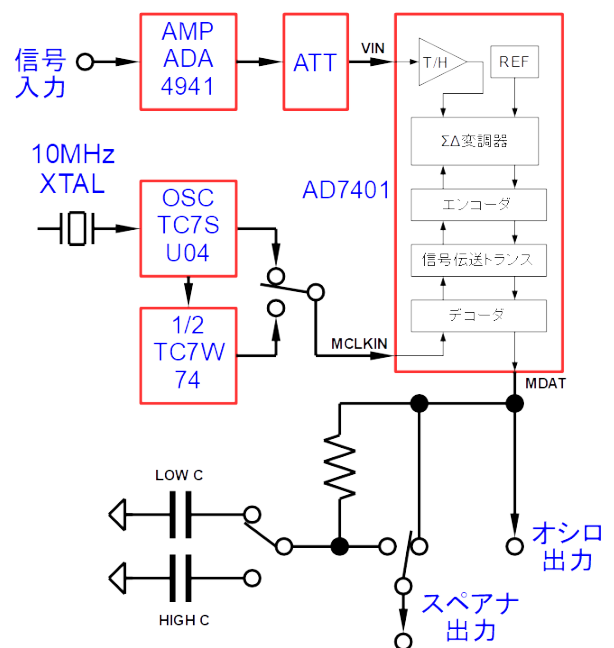


図 4. IEEC-CV001A のブロック図 (AD7401 自体の内部ブロックも示している)

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-098

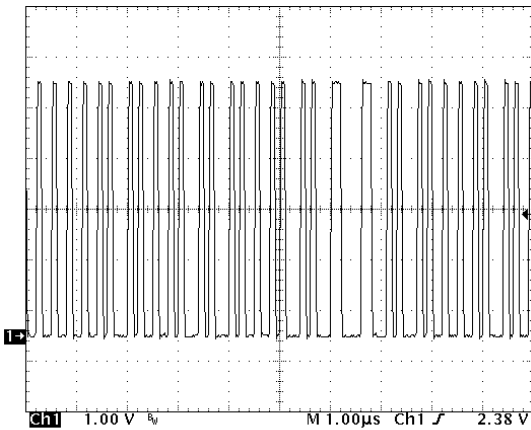


図 5. AD7401 の MDAT 出力をそのまま見た波形。ランダムな H/L になっている (サンプリング・クロック MCLK = 10MHz)

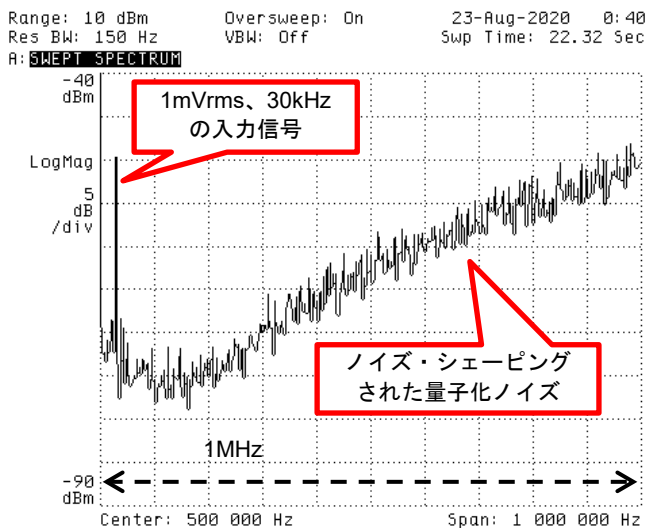


図 6. AD7401 の MDAT 出力をスペクトラム・アナライザで観測した。30kHz の入力信号のスペクトルが観測でき、量子化ノイズがシェーピングされている

実際にノイズ・シェーピングされたスペクトルを見る

つづいて IC の端子間電圧を 1mVrms (AD7401 フル・スケールの -43dB)、30kHz の交流電圧にして、スペクトラム・アナライザで MDAT 出力を観測したようすを図 6 に示します。観測帯域は 1MHz です。さきのオシロスコープによる時間軸波形では、何ら情報を持っていないように見えたが、スペクトラムを観測してみると、加えた交流電圧の成分が 30kHz のところに立っており、また量子化ノイズが高域周波数に押しやられ、整形つまりノイズ・シェーピングされていることが分かります。「なるほど、納得」ですね。

スペクトラム・アナライザの観測帯域を IIEC-CV001A で用いたサンプリング・クロック周波数 MCLK = 10MHz の倍の 20MHz まで広げると (図 7)、デジタル信号処理の教科書で見る、「5MHz を中心とした対称の折り返し」になっていません。5MHz を越えていくあたりからスペクトルのレベルが低下しています。デジタル信号処理理論やここまでの数式による理論検討と若干の差異があることに気がつきます。

この理由は、デジタル信号処理理論の視点では信号を「インパルス」(幅がなく、大きさが 1 のパルス)として取り扱う一方、AD7401 の出力は 1 サンプルあたり 0.1 μ sec の台形波である、という違いによるものです。この台形波形状を「ゼロ次ホールド」といい、[6]や[7]に説明があります。

アナログ LPF でノイズ・シェーピングされたスペクトルを取り去る (デジタル・フィルタでの処理も全く同じ)

つづいて基板上に用意してある 1 次の RC アナログ LPF をオンして、-3dB カットオフ周波数 100kHz の設定での MDAT 出力スペクトルを観測してみます。結果を図 8 に示します。高域周波数に存在していたノイズ・シェーピングされた量子化ノイズが LPF のフィルタリングにより低減し (1 次 LPF なので高域のノイズ低減度は限定的)、SNR が大きく向上しており、分解能を高められるようすが分かります。これが $\Sigma \Delta$ ADC のうごきなのです。

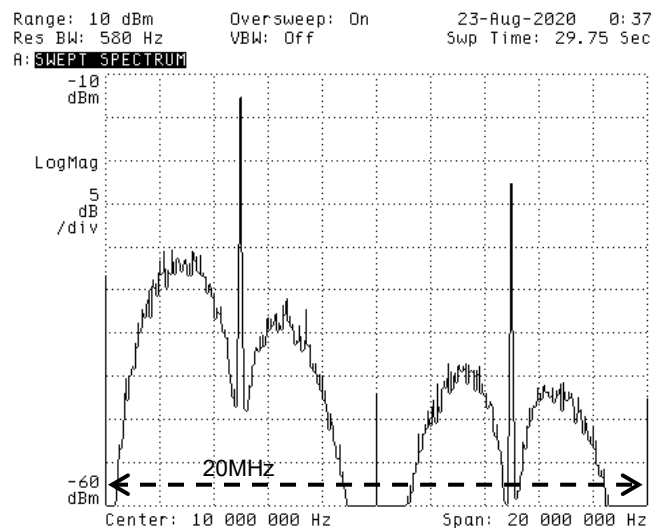


図 7. スペクトラム・アナライザの観測帯域をサンプリング・クロック周波数 MCLK = 10MHz の倍の 20MHz まで広げてみた

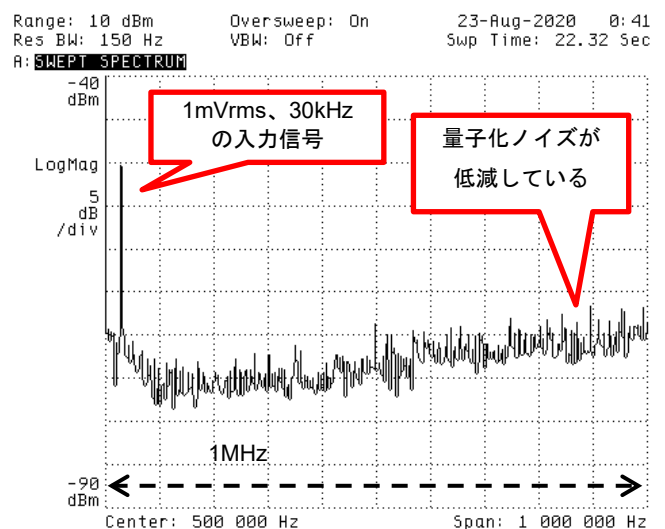


図 8. ノイズ・シェーピングされた量子化ノイズを RC アナログ LPF でフィルタリングすれば SNR が向上する (これが $\Sigma \Delta$ ADC のうごき。1 次 LPF なので高域のノイズ低減度は限定的)

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-098

実際の $\Sigma\Delta$ ADCでは、 $\Sigma\Delta$ 変調器からの1ビット・データのシリアル・ビット列を（デジタル数値として）ビット拡張しデジタルLPFで処理しますが、その基本動作は図8のアナログLPFと全く変わりません。

いよいよCDCに踏み込んでみる

この技術ノートの目的は、水晶振動子の等価電子回路パラメータのうち、端子間並列容量を測定しようというものでした。この並列容量は非常に微小な容量（1pFから数pFのオーダー）であることから、簡易的な測定器では測定ができません。

微小な容量はそれだけでも測定はタイヘンです。ここではアナログ・デバイセズの容量測定IC、AD7150という容量デジタル・コンバータ（Capacitance to Digital Converter, CDC）を用いてみたいと思います。以降ではCDCという用語を用いて述べていきます。まずAD7150をご紹介しますと、

AD7150

<https://www.analog.com/jp/ad7150>

【概要】

AD7150は容量近接センサ用の完全な信号処理ソリューションを実現しており、超低消費電力、高速応答時間などの特長を備えています。AD7151はAD7150より消費電力が低い1チャンネル・バージョンです。

AD7150はアナログ・デバイセズの容量デジタル・コンバータ（CDC）技術を採用しています。このCDC技術は、真のセンサとのインターフェースに重要な機能（高い入力感度および入力寄生グラウンド容量とリーク電流に対する高い耐性など）を結集しています。

内蔵のアダプティブ・スレッショルド・アルゴリズムにより、湿度や温度などの環境要因や誘電体の経時変化に起因するセンサの容量変動が補償されています。

 $\Sigma\Delta$ ADCとCDCの構成を比較する $\Sigma\Delta$ ADCとCDCの同じところ

前回、CDCの動作は $\Sigma\Delta$ ADCの動作とほぼ同じ、と説明しました。 $\Sigma\Delta$ ADCは電圧値を $\Sigma\Delta$ 変調により1ビット・データのシリアル・ビット列に変換するものですが、CDCは容量（実際は容量に蓄積される電荷）を $\Sigma\Delta$ 変調により1ビット・データのシリアル・ビット列に変換するものです。そしてそれぞれ、それをデジタル・フィルタで平滑することで複数ビット（ $\Sigma\Delta$ ADCでは16ビットから24ビット。AD7150では有効ビット数12ビット）のAD変換値、つまり電圧値や容量値の測定デジタル値を得ることになります。

ここではCDCの動作を理解するために、まずは $\Sigma\Delta$ ADCとCDCが同じところのしくみを理解してみましょう。

図9は $\Sigma\Delta$ 変調器の基本回路です。この回路を「チャージ・バランシング回路」とも呼びます。CDCも同じになります。サンプル・ホールド動作はコンデンサ C_{SH} の充放電により行われます。この図はサンプル動作の状態を示しています。入力信号 V_{IN} はサンプル・ホールド・コンデンサ C_{SH} に充電されます。またリファレンス電圧用コンデンサ C_{REF} にはリファレンス電圧 $V_{REF(+)}$ （もしくは $V_{REF(-)}$ ）が充電されます。積分器出力にはこれまでの経過の積分結果 C [V]が現れています。

つづいて図10はサンプル状態からホールド状態に変化した瞬間の状態のものです。各部のスイッチが赤のように切り替わり、サンプル状態が終了します。

図11はホールド状態に変化してから十分時間が経過したときの状態と電圧です。積分器は十分にゲインが大きいので、積分器の入力端子がグラウンド・レベルと同一になるように、各コンデンサの電荷が移動します。ホールド動作で定常状態に達したときには C_{REF} と C_{SH} の電圧がゼロになり、それらの電荷分が C_{INT} に充電されることとなります。

これにより積分器出力 V_{INTOUT} は同図11のように

$$V_{INTOUT} = V_{REF(+)} - V_{IN} + C \quad (1)$$

が得られるようになります。これが今回の積分結果 C [V]となり、次の積分動作（ホールド動作）では、ここにさらに次の $V_{REF(+)} - V_{IN}$ が積分されることとなります。

$\Sigma\Delta$ ADCとCDCで同じところは、この回路全般での動作になります。以降に違うところを示しますが、その部分だけで、他の部分の動作はそれぞれ同じです。

 $\Sigma\Delta$ ADCとCDCの違いところ

$\Sigma\Delta$ ADCとCDCで違うところは、入力サンプル・ホールド・コンデンサ C_{SH} とそのスイッチ部分です。CDCでは $\Sigma\Delta$ ADCの C_{SH} が被測定コンデンサ C_{DUT} になります。このようすを図12に示します。 $\Sigma\Delta$ ADCとCDCでは、この部分だけしか違いが無いのです。図12はCDCがサンプル状態になっているときのものです。ここで $\Sigma\Delta$ ADCとCDCそれぞれの測定方法としては

- $\Sigma\Delta$ ADCはサンプル・ホールド・コンデンサ C_{SH} の容量が既知で、入力電圧（測定電圧） V_{IN} が未知

- CDCは被測定コンデンサ C_{DUT} （DUT = Device Under Test）の容量が未知で、 V_{EXC} （Excitation = 励起）の電圧が既知

という違いだけになります。

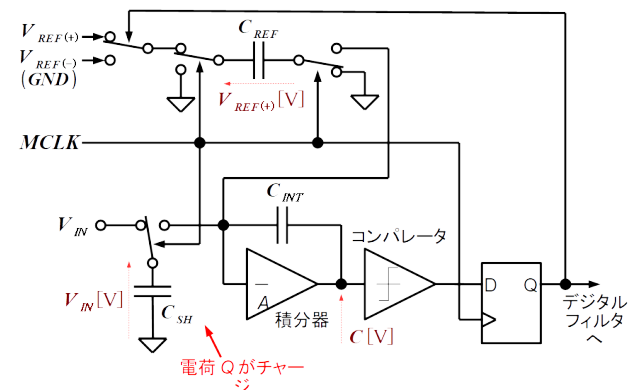


図9. $\Sigma\Delta$ ADCのうごき①。サンプル状態とそのときの電圧

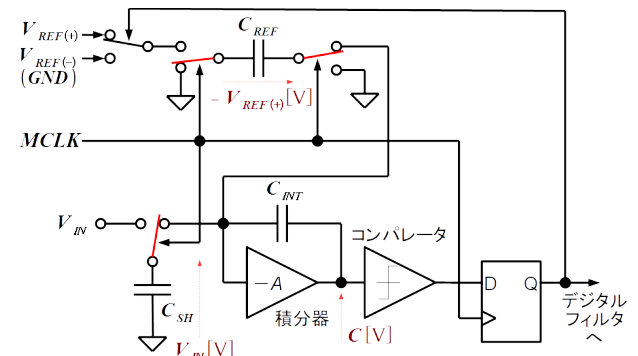


図10. $\Sigma\Delta$ ADCのうごき②。サンプル状態からホールド状態に変化した瞬間の状態と電圧

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-098

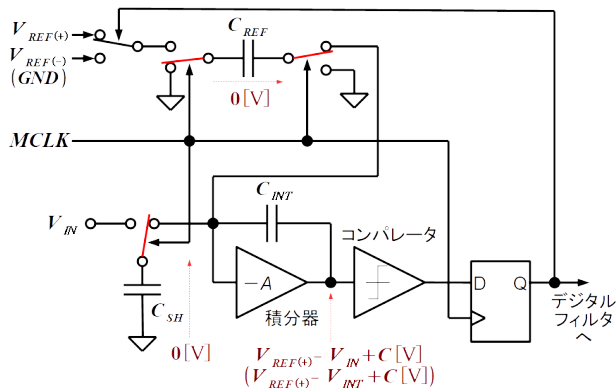


図 11. $\Sigma \Delta$ ADC のうごき ③。ホールド状態に変化してから十分時間が経過したときの状態と電圧 ($C_{REF} = C_{SH} = C_{INT}$ と仮定している)

$\Sigma \Delta$ ADC はサンプル・ホールド・コンデンサが内蔵 (容量が既知) になっている

$\Sigma \Delta$ ADC の説明では、「入力電圧値 V_{IN} が積分器出力に現れる」と説明しました。しかしこの図 9 の回路はチャージ・バランシング回路ということで、「チャージされた電荷量が積分器出力に現れる」という表現のほうが正しくなります。これは図 9 において入力電圧 V_{IN} でサンプル・ホールド・コンデンサ C_{SH} に電荷

$$Q = C_{SH} V_{IN} \quad (2)$$

がチャージされ、図 10、図 11 のホールド動作においてチャージされた Q が積分器のコンデンサ C_{INT} に転送されることになります。それが積分器出力のもとの電圧 C [V] に足し合わされる電圧 V_{INT} として

$$V_{INT} = \frac{Q}{C_{INT}} = \frac{C_{SH}}{C_{INT}} V_{IN} \quad (3)$$

となり、ここで C_{SH} と C_{INT} はそれぞれ既知、またここで $C_{SH} = C_{INT}$ と仮定すると、積分器出力で足し合わされる電圧 V_{INT} と入力信号 V_{IN} との関係が

$$V_{INT} = V_{IN} \quad (4)$$

となり、積分器出力

$$V_{INTOUT} = V_{REF(+)} - V_{IN} + C \quad (1) \text{ 再掲}$$

が得られます [これが式(1)です]。実際は一回のサンプル・ホールド動作で AD 変換ができるわけではなく、これまで説明してきたように $\Sigma \Delta$ ADC では V_{INTOUT} が 2 値化されますので、ビット・ストリームとなる連続する複数ビットの平均値として AD 変換結果が得られることになります。

CDC は被測定コンデンサが外付け (容量が未知) になっている

さきに示したように CDC では「被測定コンデンサ C_{DUT} の容量が未知で、 V_{EXC} (Excitation = 励起) の電圧が既知」となります。図 12 を使って説明してみると、まず被測定コンデンサ C_{DUT} に励起電圧 V_{EXC} が加わることで電荷

$$Q = C_{DUT} V_{EXC} \quad (5)$$

がチャージされます。つづいて図 13 に示すようにホールド動作においてチャージされた Q が積分器のコンデンサ C_{INT} に転送されることになります。それが積分器出力のもとの電圧 C [V] に足し合わされる電圧 V_{INT} として

$$V_{INT} = \frac{Q}{C_{INT}} = \frac{C_{DUT}}{C_{INT}} V_{EXC} \quad (6)$$

$$V_{INTOUT} = V_{REF(+)} - V_{INT} + C$$

$$= V_{REF(+)} - \frac{C_{DUT}}{C_{INT}} V_{EXC} + C \quad (7)$$

となり、ここで V_{EXC} と C_{INT} はそれぞれ既知なので、積分器出力と被測定コンデンサ C_{DUT} との関係を得ることができるわけです。このようにホントに $\Sigma \Delta$ ADC と CDC は構成が同じ (測定方法の異なる) ということが分かりますね。

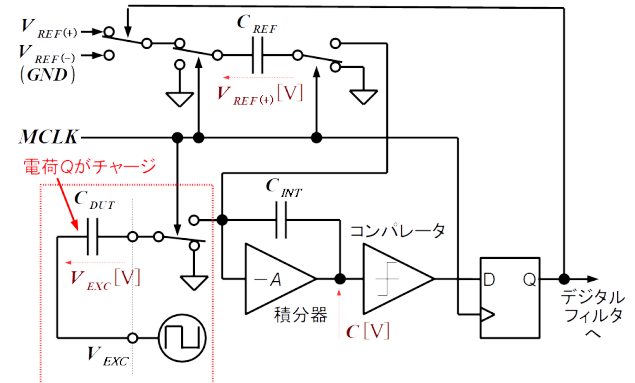


図 12. CDC のブロック図とそのうごき ①。 $\Sigma \Delta$ ADC と異なる部分を赤枠で表記した。赤枠内だけしか違いはない。赤字表記はサンプル状態のときの電圧

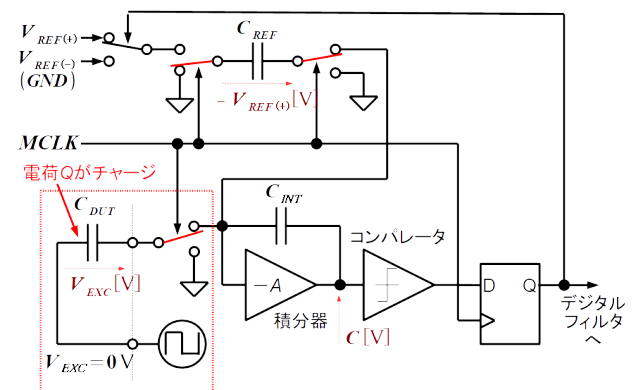


図 13. CDC のブロック図とそのうごき ②。サンプル状態からホールド状態に変化した瞬間の状態と電圧

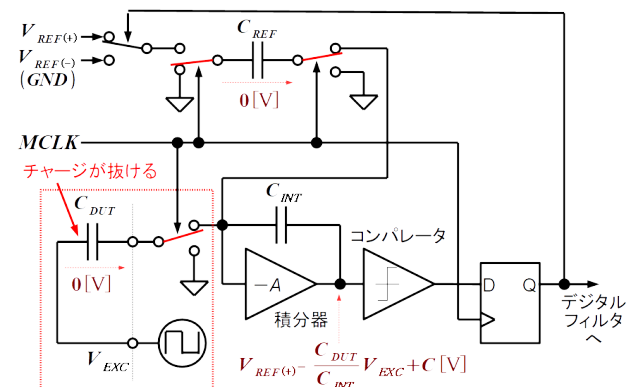


図 14. CDC のブロック図とそのうごき ③。ホールド状態に変化してから十分時間が経過したときの状態と電圧

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-098

さいごに

この 2 冊目のノートで容量デジタル・コンバータ・シリーズを終わりにしようと思っていましたが、あっという間にノートのページが埋まってしまいました…。

今回の前半では、前回の続きで容量デジタル・コンバータ (Capacitance to Digital Converter, CDC) と同じ動作原理である $\Sigma \Delta$ AD コンバータのノイズ・シェーピング動作の実際を見てきました。

つづいて $\Sigma \Delta$ AD コンバータと CDC の同じところと違うところを説明しました。 $\Sigma \Delta$ AD コンバータと CDC の差異は $\Sigma \Delta$ AD コンバータでのサンプル・ホールド・コンデンサが CDC では被測定コンデンサであるということです。最終的に電圧や容量を得るというゴールは異なりますが、その他の過程はほぼ同じといっていよいでしょう。

この WEB ラボ、探求していけばいくほど、「なるほどなあ」と書いている本人も学びの連続です。

そして次回はいよいよこのシリーズの最終回。被測定対象の水晶振動子の容量と測定上の注意点について説明し、実際に AD7150 の評価ボードを使用して水晶振動子の並列容量を測定してみたいと思います。

参考文献

- [1] ハイポネックス原液のご紹介, 株式会社ハイポネックスジャパン, <https://www.hyponex.co.jp/products/products-637/>
- [2] ハイポニカについて, 協和株式会社ハイポニカ事業本部, <https://www.kyowajpn.co.jp/hyponica/introduction/index.html>
- [3] 微粉ハイポネックスのご紹介, 株式会社ハイポネックスジャパン, <https://www.hyponex.co.jp/products/products-635/>
- [4] パネル de ボード, P 板 .com, <https://www.p-ban.com/panel de board/>
- [5] David Krakauer; デジタル・アイソレータの構造, 技術記事 MS-2234, アナログ・デバイセズ, https://www.analog.com/media/jp/technical-documentation/tech-articles/MS-2234_jp.pdf
- [6] 石井 聡; DAC の妙技「MIX MODE」をデジタル信号処理の理論的視点から考える, TNJ-014, 回路設計 WEB ラボ, アナログ・デバイセズ, <https://www.analog.com/jp/education/landing-pages/003/jp-web-lab/tmj-014.html>
- [7] Zero-order hold, Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Zero-order_hold