

マルチトーン入力 ADCヒストグラム法での線形性試験

小澤祐喜、上森聡史、桑名杏奈、浅見幸司、小林春夫

群馬大学大学院 理工学府

小林研究室 修士2年

小澤 祐喜

t13304037@gunma-u.ac.jp

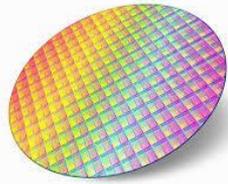
OUTLINE

- 研究背景
- 線形性テスト
- マルチトーンテスト信号生成方法
- 微分非線形性・積分非線形性の導出
- シミュレーション結果
- まとめと今後の課題

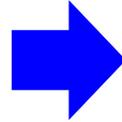
OUTLINE

- 研究背景
- 線形性テスト
- マルチトーンテスト信号生成方法
- 微分非線形性・積分非線形性の導出
- シミュレーション結果
- まとめと今後の課題

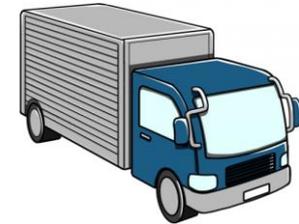
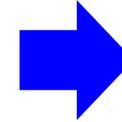
研究背景



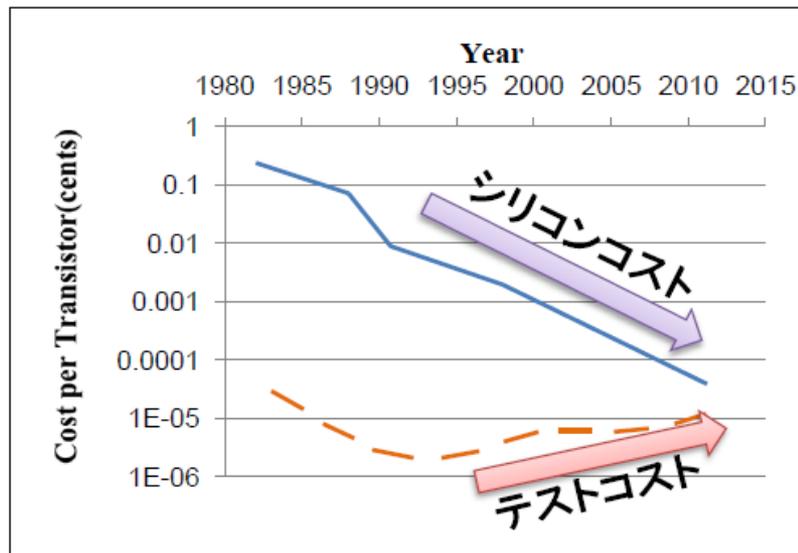
LSI



テスト
良否判定

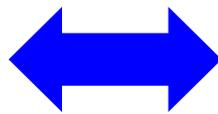


出荷



- ✓ 如何に精度を良くするか
- ✓ 如何にテストコストを下げるか

テスト品質

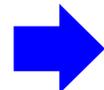


テストコスト

トレードオフ

研究目的

➤ SoC内ADCの線形性テストは重要な試験

 時間がかかる & テストコスト大

テスト時間を短縮しつつ線形性テストの精度を高める



マルチトーンテスト信号を生成しADCに入力

研究の現状

 ADCヒストグラムテスト向け マルチトーンテスト信号の生成アルゴリズムの提案

 マルチトーンテスト信号からDNL, INLを導出するアルゴリズムの提案

本研究

OUTLINE

- 研究背景
- 線形性テスト
- マルチトーンテスト信号生成方法
- 微分非線形性・積分非線形性の導出
- シミュレーション結果
- まとめと今後の課題

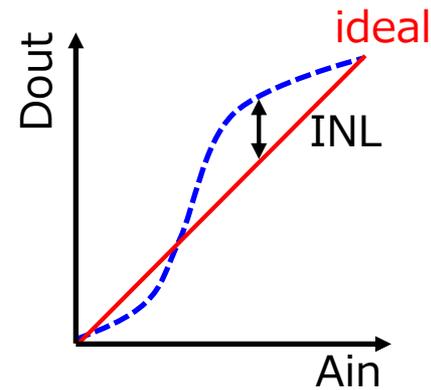
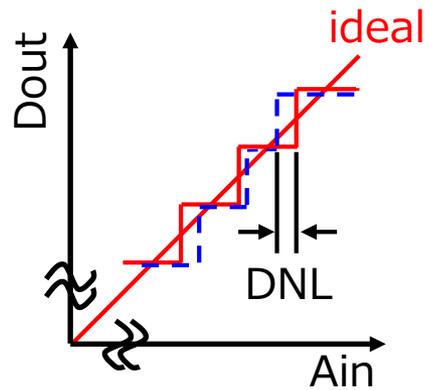
線形性テスト

積分非線形性
(INL)

微分非線形性
(DNL)



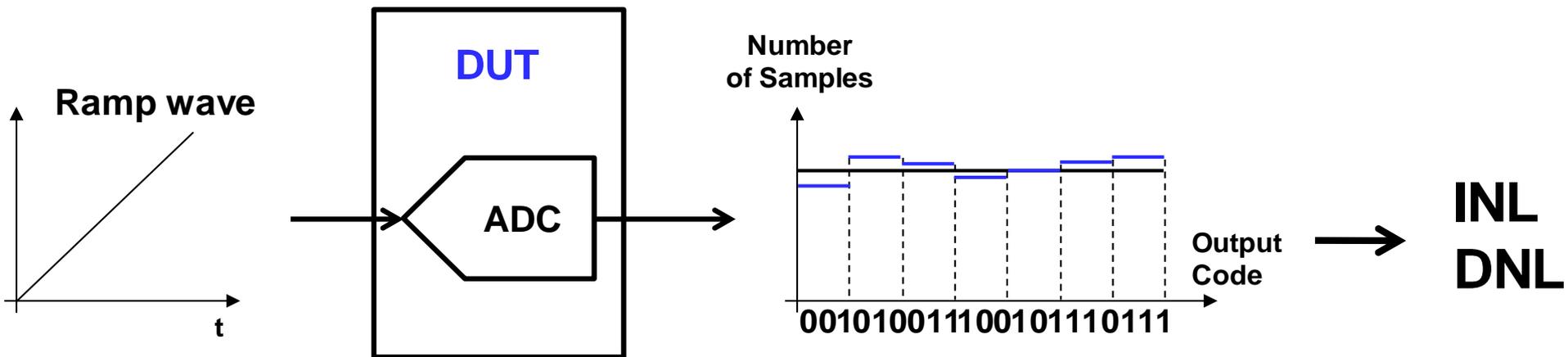
SoC内のADCでは
特に重要な試験項目



DNL : 実際のステップが理想的なステップからどの程度離れているか

INL : 理想的な直線に対する実際の入出力特性

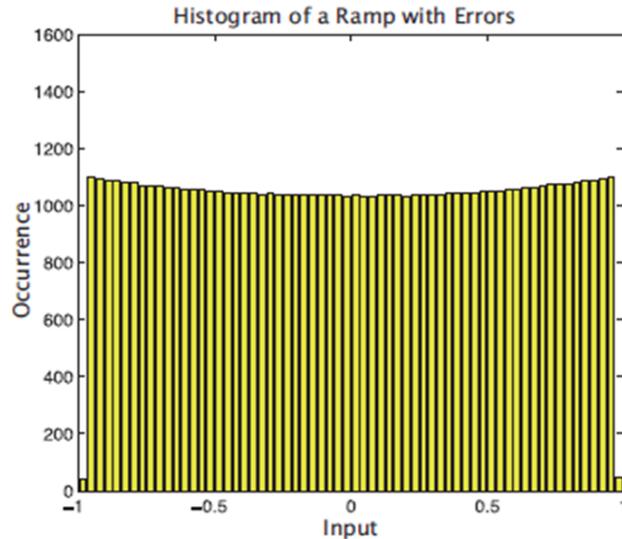
ランプ波ヒストグラム法



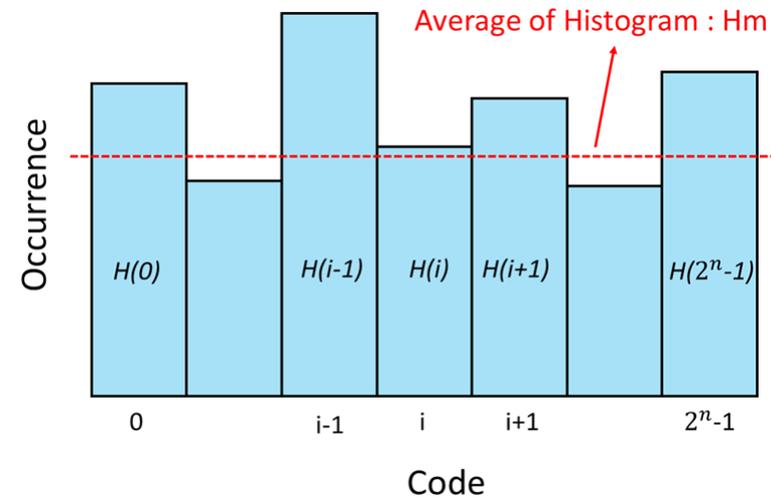
○ コード幅がヒストグラムに比例するため解析が容易

✕ 歪の無いランプ波を生成するのは困難

ランプ波ヒストグラム法DNL、INL計算



歪を考慮したヒストグラム例



コード幅がヒストグラムに比例

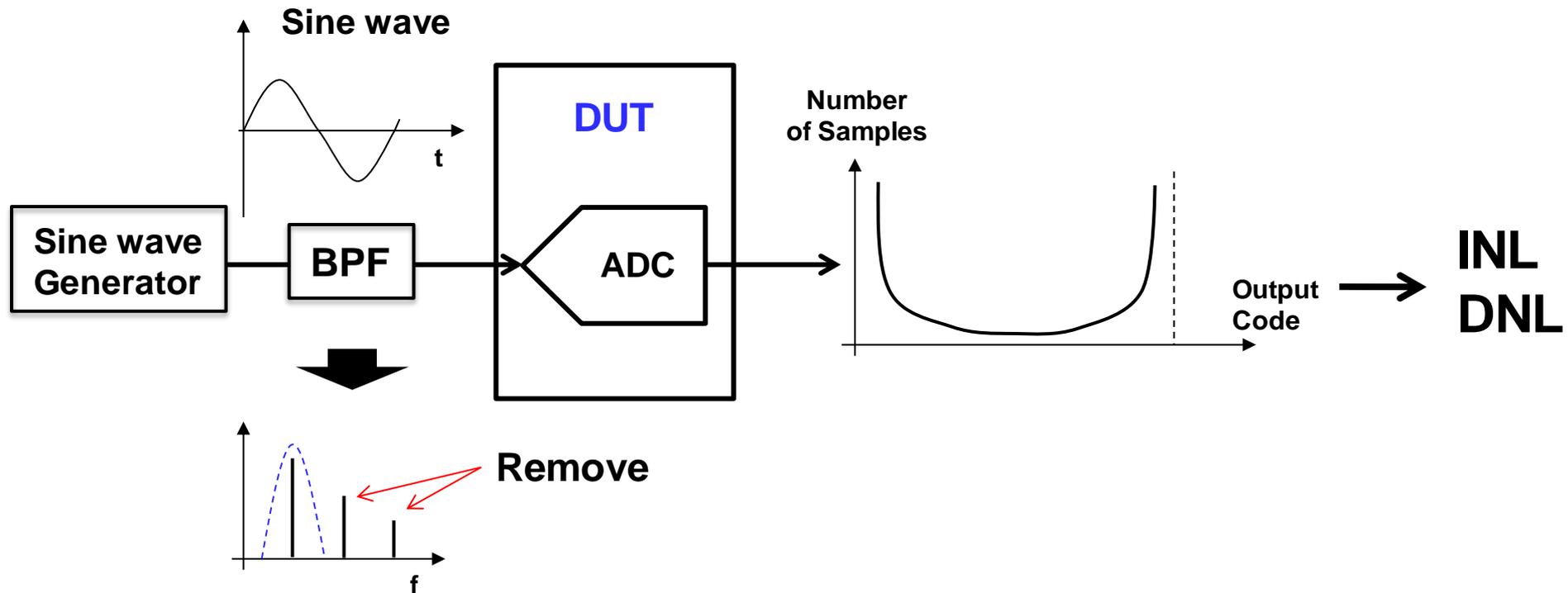


解析が容易

$$DNL(i) = \frac{H(i) - H_m}{H_m} \quad [\text{LSB}]$$

$$INL(i) = \sum_{i=1}^k DNL(i) \quad [\text{LSB}]$$

正弦波ヒストグラム法



- 歪の無い正弦波の生成はアナログフィルタにより容易
- △ コード幅がヒストグラムに比例しないため解析が複雑
- × コード中央付近のヒストグラムが不足する

OUTLINE

- 研究背景
- 線形性テスト
- マルチトーンテスト信号生成方法
- 微分非線形性・積分非線形性の導出
- シミュレーション結果
- まとめと今後の課題

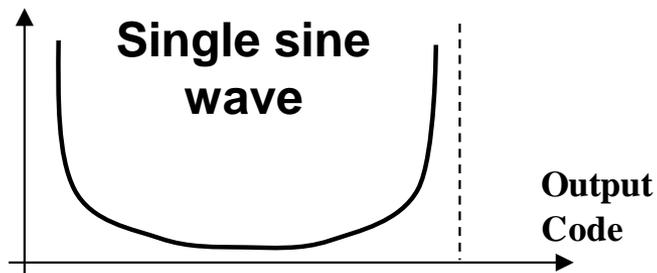
SoC内ADC線形性テスト

- アナログ ミクスト シグナルSoC内ADCでは・・・
 - ・入力フルレンジではなく、コードの中心付近を主に使用する
 - ・正弦波ヒストグラム法は非効率

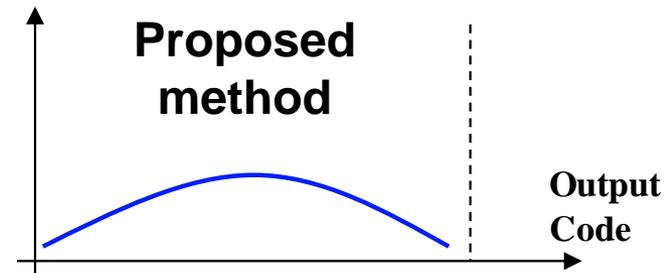


コードの中心付近にヒストグラムを集中させて高効率化

Number
of Samples

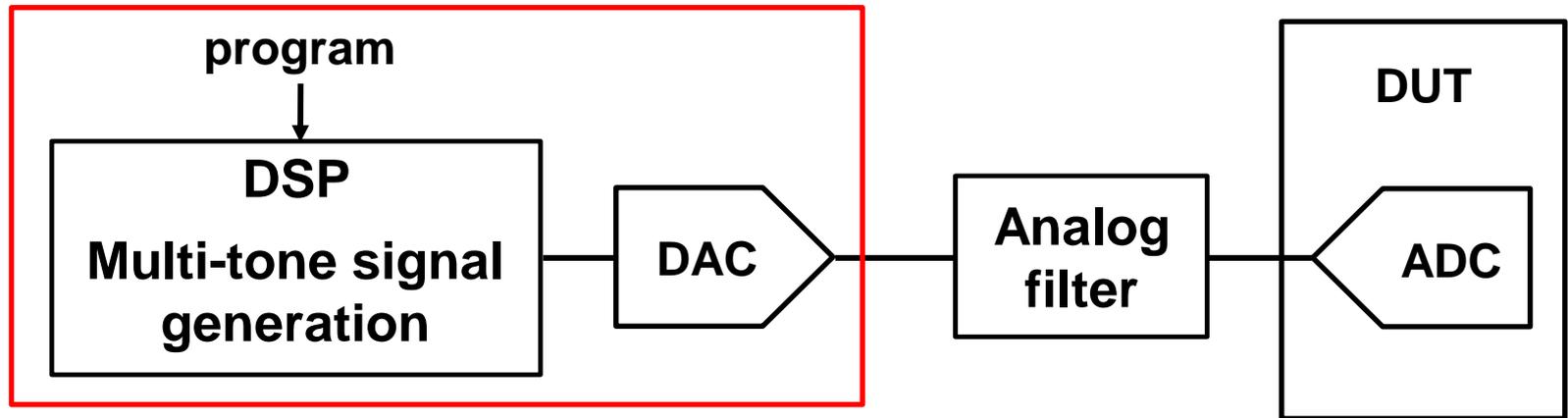


Number
of Samples



AWGによるテスト信号生成

AWG: Arbitrary Waveform Generator



DSP : マルチトーン信号をプログラム
アナログフィルタ : 高調波成分を除去



ヒストグラムをコードの中央に集中させる

マルチトーンテスト信号生成方法

- 三角波を複数正弦波で近似する式を参考

$$f(t) = \sum_{m=1}^N A_m W_m(t)$$

$$W_m(t) = \frac{\cos((2m-1)\omega t)}{(2m-1)^2} \quad m = 1, 2, \dots$$

各項の振幅 A_m 、足し合わせる項 W_m の選択

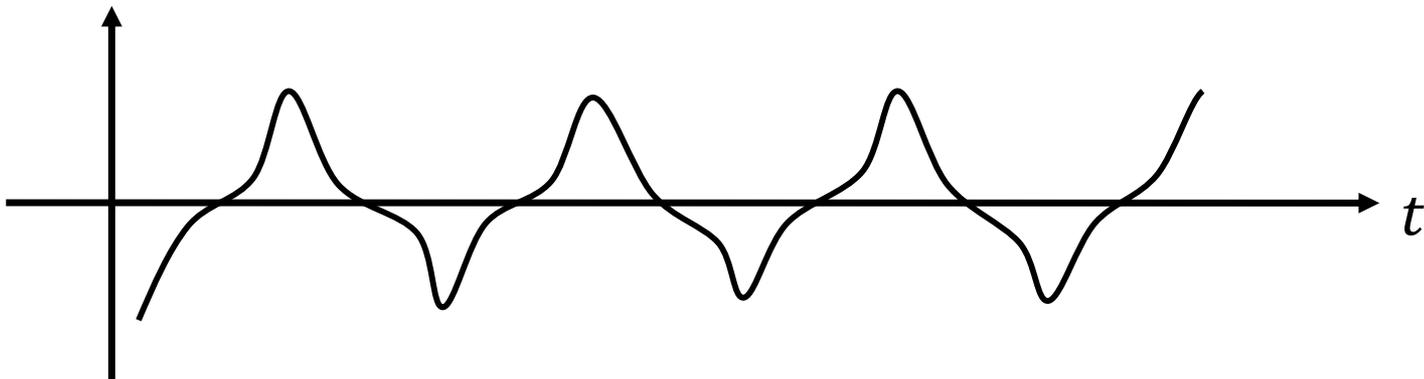


出力コードの中心付近のヒストグラムを増加

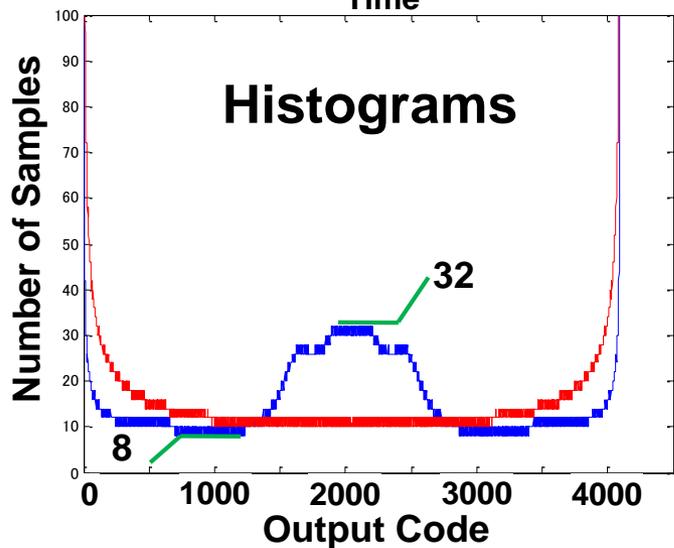
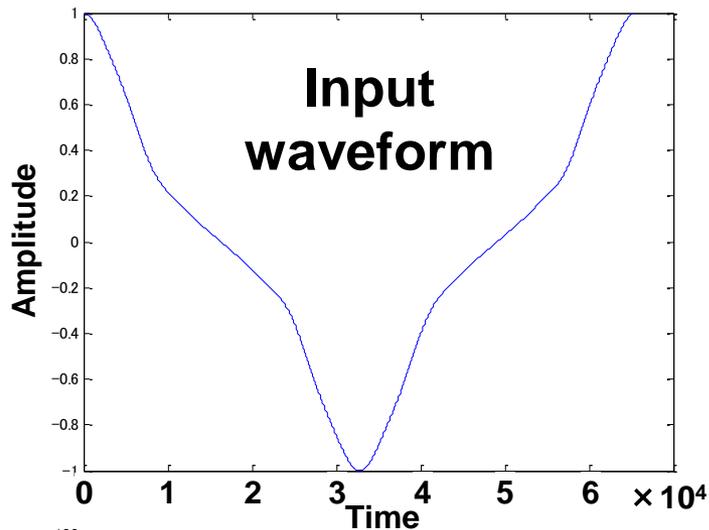


テスト時間の短縮
テスト品質の高品質化

マルチトーンテスト信号例



マルチトーンヒストグラム例



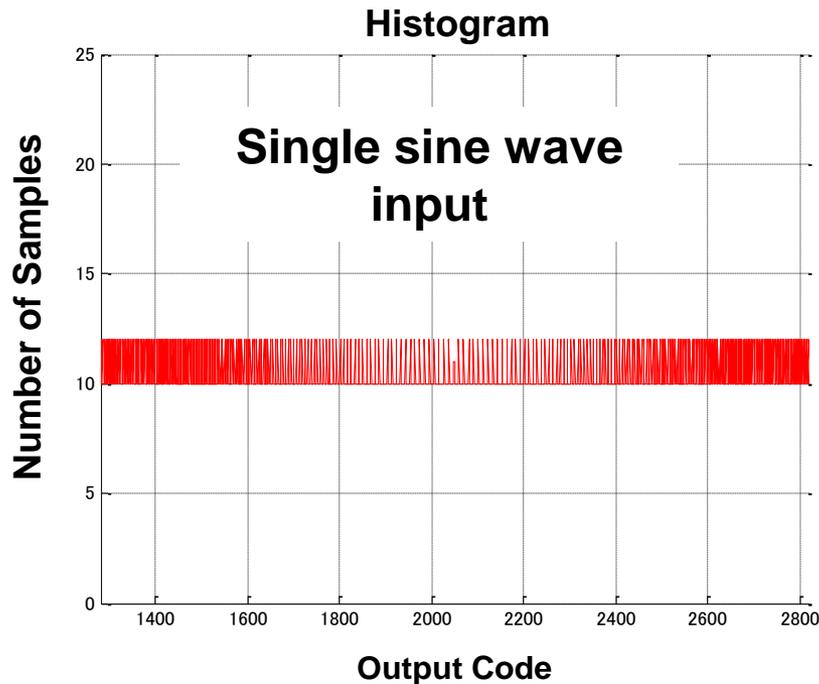
$$\left\{ \begin{array}{l} f(t) = \sum_{m=1}^N A_m W_m(t) \\ W_m(t) = \frac{\cos((2m-1)\omega t)}{(2m-1)^2} \quad m = 1, 2, \dots \end{array} \right.$$

$$f(t) = \frac{4}{\pi} (W_1 + 2.6 \cdot W_2 + 1.8 \cdot W_3 + 1.4 \cdot W_6 + 1.2 \cdot W_7)$$

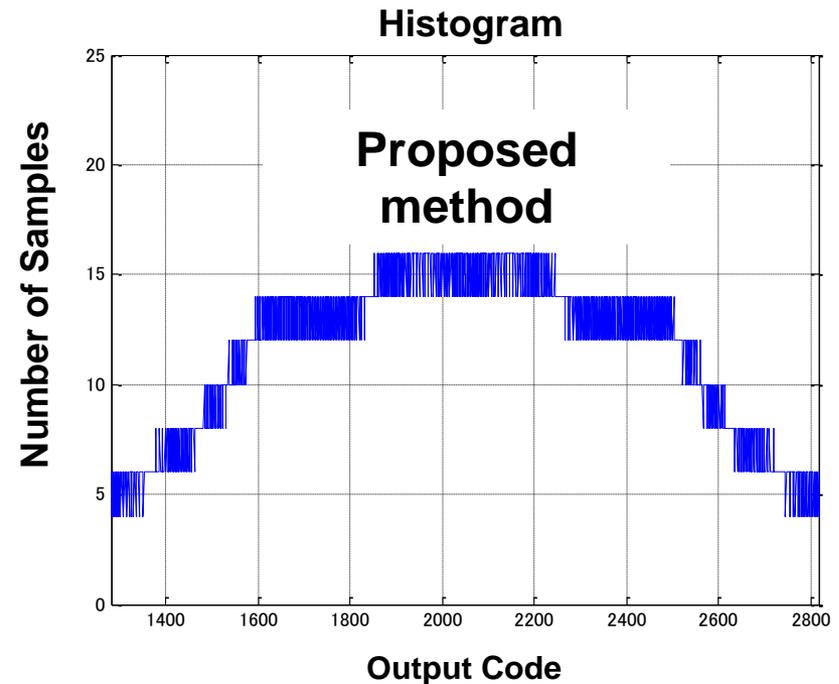
- コード中央部のヒストグラムが増加

ヒストグラム点数の削減

[条件] ADCの中央部は10点以上、両端付近は4点以上のサンプル



Total sampling points :
65536



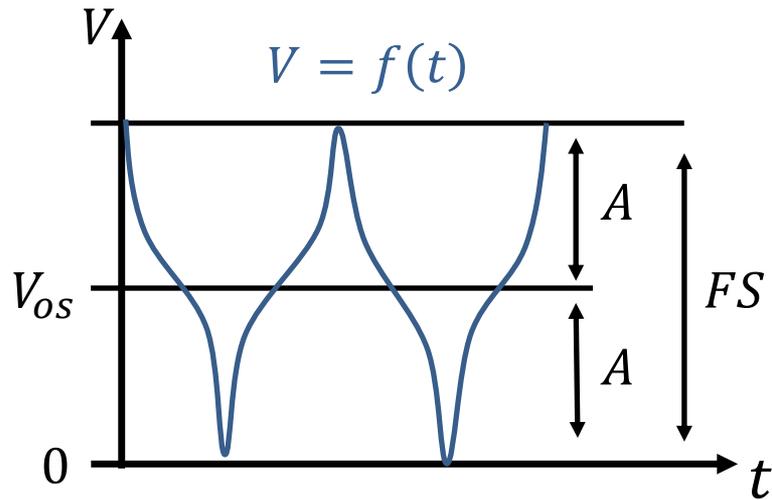
Total sampling points :
32768

ヒストグラム点数が約1/2に削減

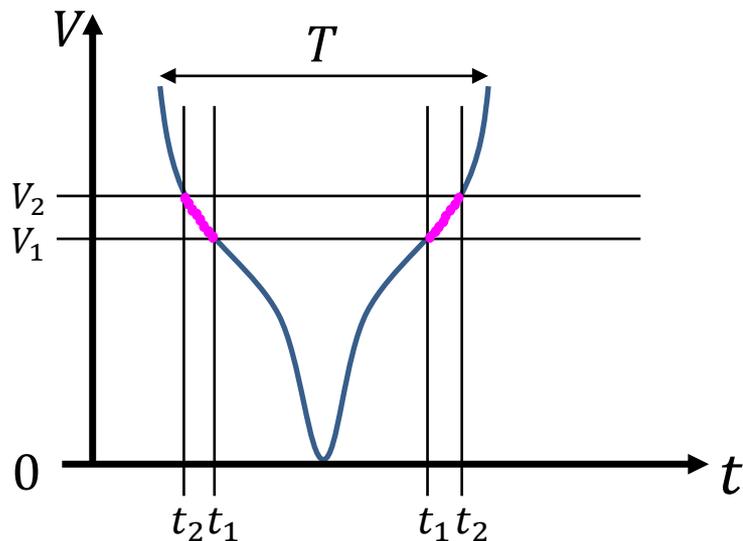
OUTLINE

- 研究背景
- 線形性テスト
- マルチトーンテスト信号生成方法
- 微分非線形性・積分非線形性の導出
- シミュレーション結果
- まとめと今後の課題

微小電圧間に入る確率の導出



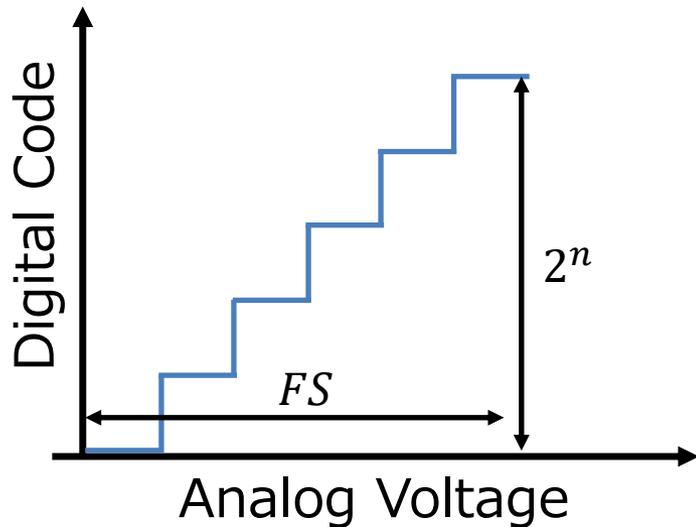
$f(t)$: 1周期に $f'(t) = 0$ となる点を
2つ持つ任意の周期関数



$V = f(t)$ が電圧 V_1 と V_2 の間にある確率 P は

$$P = \frac{2(t_2 - t_1)}{T} = \frac{2(f^{-1}(V_2) - f^{-1}(V_1))}{T}$$

累積確率密度から閾値 V_i を求める



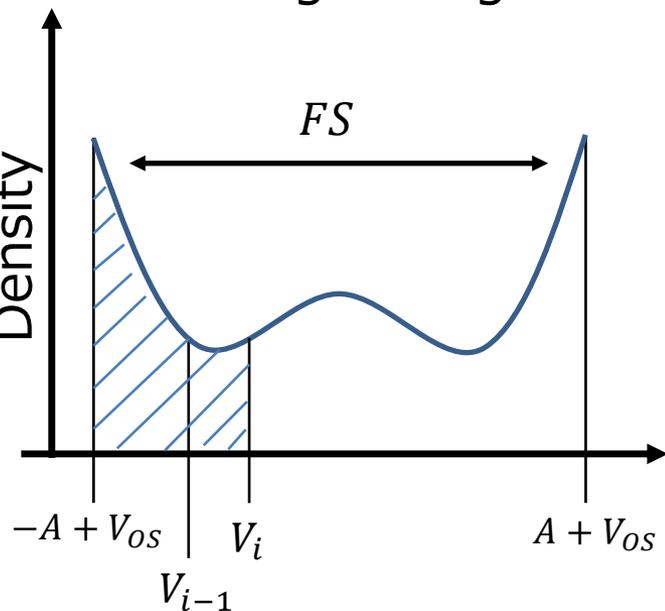
コード $i-1$ からコード i の確率密度 $P[i]$

$$P[i] = \frac{2(f^{-1}(V_i) - f^{-1}(V_{i-1}))}{T} \quad i = 0, 1, \dots, 2^n - 1$$

コード 0 からコード i までの累積確率密度 $PI[i]$

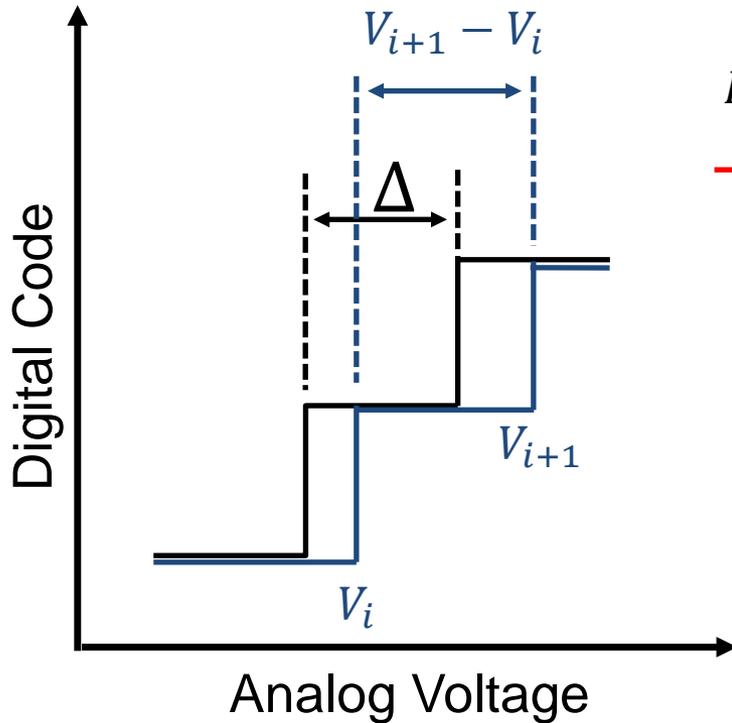
$$\begin{aligned} PI[i] &= \sum_{k=0}^i P[k] \\ &= \frac{2}{T} f^{-1}(V_i) \end{aligned}$$

$$\therefore V_i = f\left(\frac{T}{2} PI[i]\right)$$



※確率密度関数はヒストグラムのデータを正規化
 ※p.d.f.は取得データを任意の関数にフィッティング

累積確率密度からDNLを導く



Δ : 理想的なコード幅

$$\Delta = \frac{V_{2^n-2} - V_0}{2^n - 2}$$

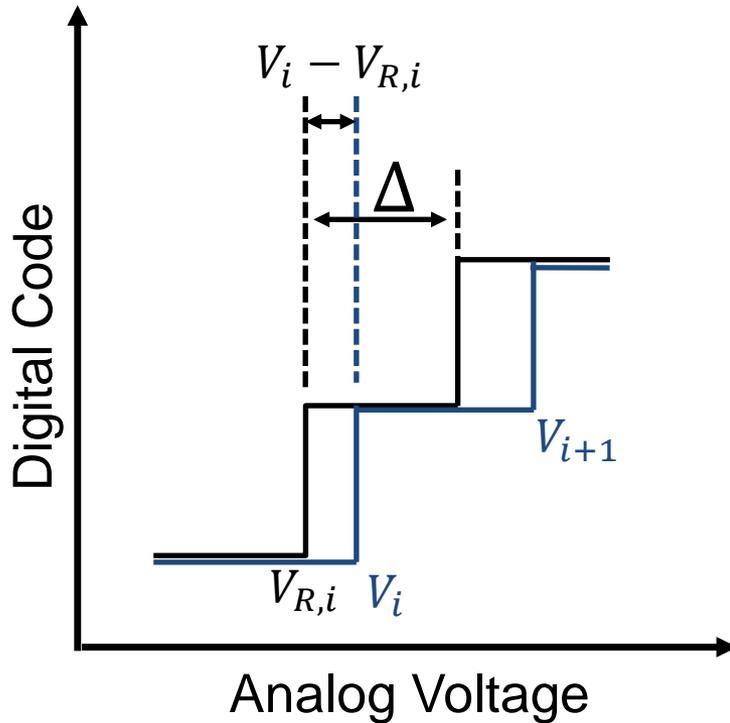
$$DNL[i] = \frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta} - 1 \text{ [LSB]} \quad i = 0, 1, 2, \dots, 2^n - 2$$

$$= \frac{V_{i+1} - V_i}{\frac{V_{2^n-2} - V_0}{2^n - 2}} - 1$$

$$= (2^n - 2) \frac{V_{i+1} - V_i}{V_{2^n-2} - V_0} - 1$$

$$= (2^n - 2) \frac{f\left(\frac{T}{2} PI[i+1]\right) - f\left(\frac{T}{2} PI[i]\right)}{f\left(\frac{T}{2} PI[2^n - 2]\right) - f\left(\frac{T}{2} PI[0]\right)} - 1$$

累積確率密度からINLを導く



$V_{R,i}$: 理想的な特性

$$V_{R,i} = V_{R,0} + \Delta \cdot i$$

$$INL[i] = \frac{V_i - V_{R,i}}{\Delta} [LSB] \quad i = 0, 1, 2, \dots, 2^n - 2$$

$$= \frac{V_i - (V_{R,0} + \Delta \cdot i)}{\Delta}$$

$$= \frac{V_i - (V_0 + \Delta \cdot i)}{\Delta}$$

$$= \frac{V_i - V_0}{\Delta} - i$$

$$= \frac{V_i - V_0}{\frac{V_{2^n-2} - V_0}{2^n - 2}} - i$$

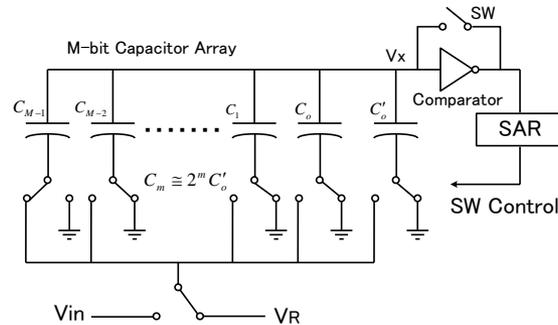
$$= (2^n - 2) \frac{f\left(\frac{T}{2} PI[i]\right) - f\left(\frac{T}{2} PI[0]\right)}{f\left(\frac{T}{2} PI[2^n - 2]\right) - f\left(\frac{T}{2} PI[0]\right)} - i$$

OUTLINE

- 研究背景
- 線形性テスト
- マルチトーンテスト信号生成方法
- 微分非線形性・積分非線形性の導出
- シミュレーション結果
- まとめと今後の課題

シミュレーションによる確認

マルチトーン
テスト信号



SAR型ADC

ヒストグラム

非線形性評価
(DNL&INL)

[条件]

- シミュレーションソフト : MATLAB
- ADC方式 : SAR型ADC
- 分解能 : 6-bit , 64-level
- フルレンジ : 0 – 8.0V
- 入力テスト信号 :

$$f(t) = A(W_1 + 2.6 \cdot W_2 + 1.8 \cdot W_3 + 1.4 \cdot W_6 + 1.2 \cdot W_7) + V_{OS}$$

$$A = 2.90V$$

$$V_{OS} = 4.0V$$

- 1LSB = 0.125V

$$f(t) = \sum_{m=1}^N A_m W_m(t)$$

$$W_m(t) = \frac{\cos((2m-1)\omega t)}{(2m-1)^2}$$

- ADCの非線形モデル(SAR型ADC)

$$\text{Dummy} = \text{LSB};$$

$$\text{Weight 1} = \text{LSB} - 0.01;$$

$$\text{Weight 2} = 2 * \text{LSB} - 0.01;$$

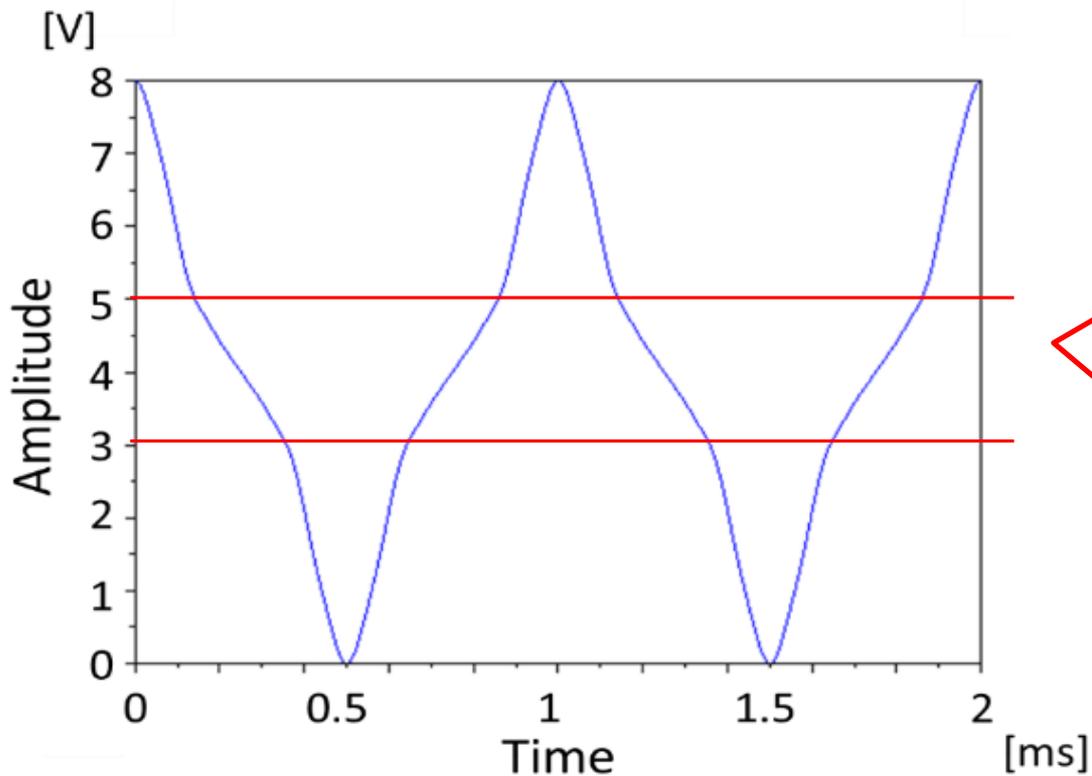
$$\text{Weight 4} = 4 * \text{LSB} - 0.01;$$

$$\text{Weight 8} = 8 * \text{LSB} - 0.01;$$

$$\text{Weight 16} = 16 * \text{LSB} - 0.01;$$

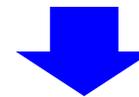
$$\text{Weight 32} = 32 * \text{LSB} + 0.05;$$

マルチトーンテスト信号



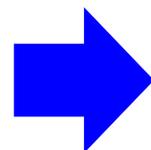
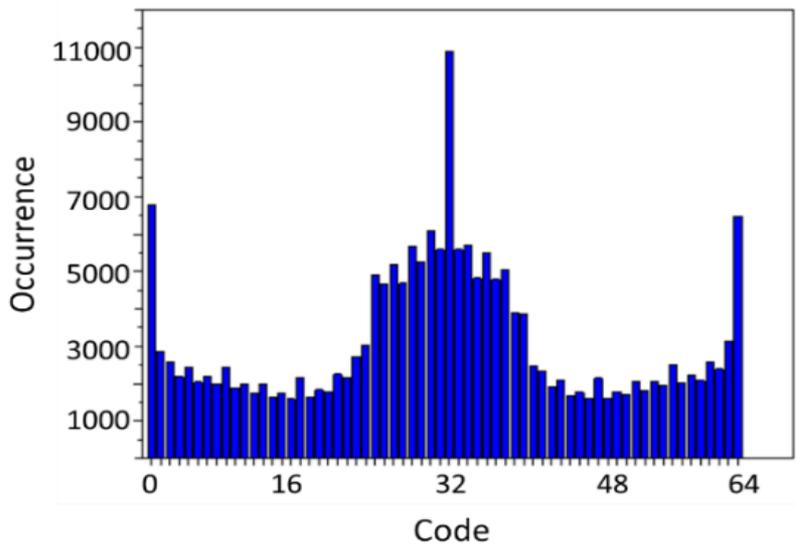
入力マルチトーンテスト信号

コード中央の傾きが緩やか

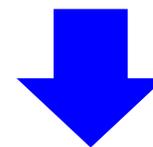
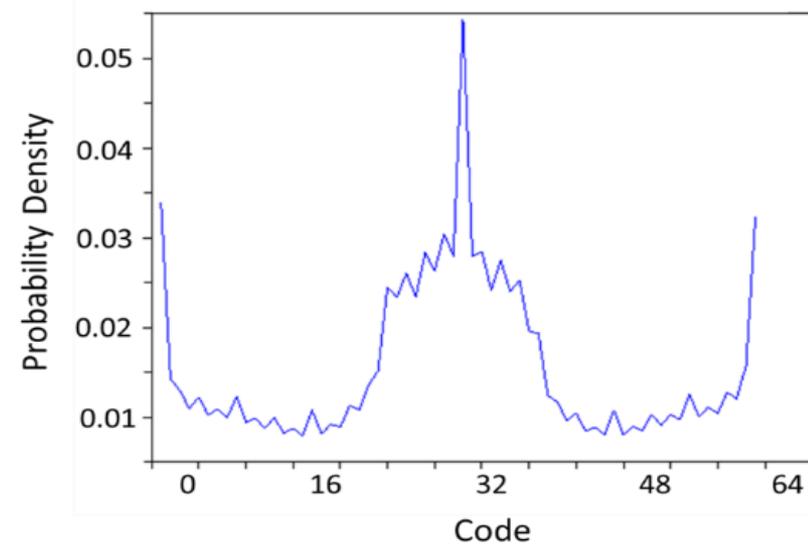


コード中央のヒストグラムが増加

ヒストグラムの解析



正規化



確率密度 P を積分し

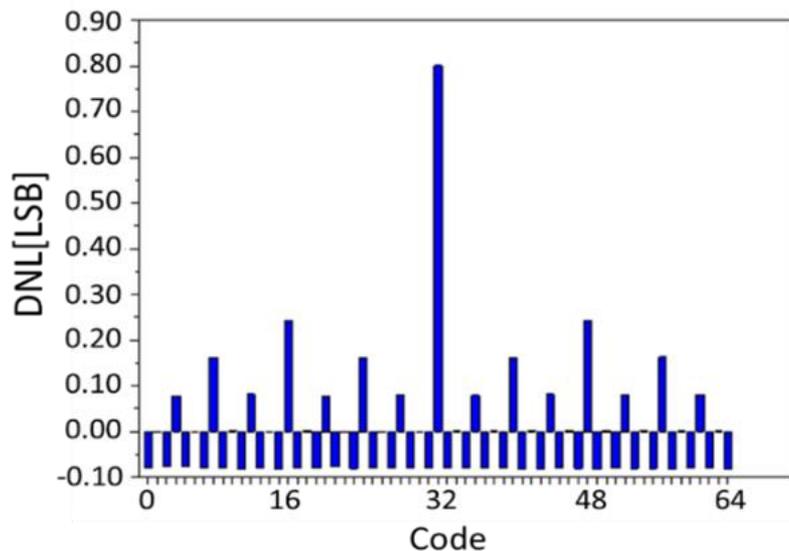
累積確率密度 PI を計算

中央部にヒストグラムが集中

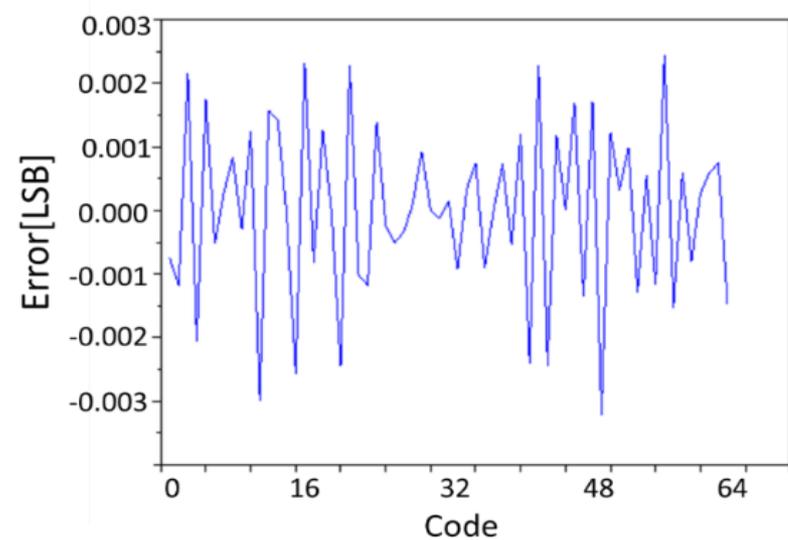


単一正弦波と比べ無駄な点数を取らなくて済む

DNLの計算結果・評価



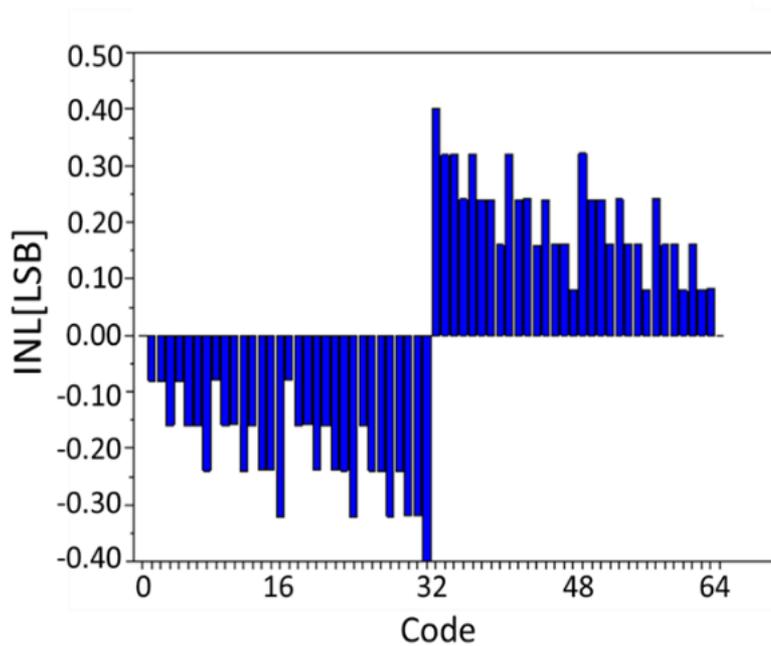
算出されたDNL



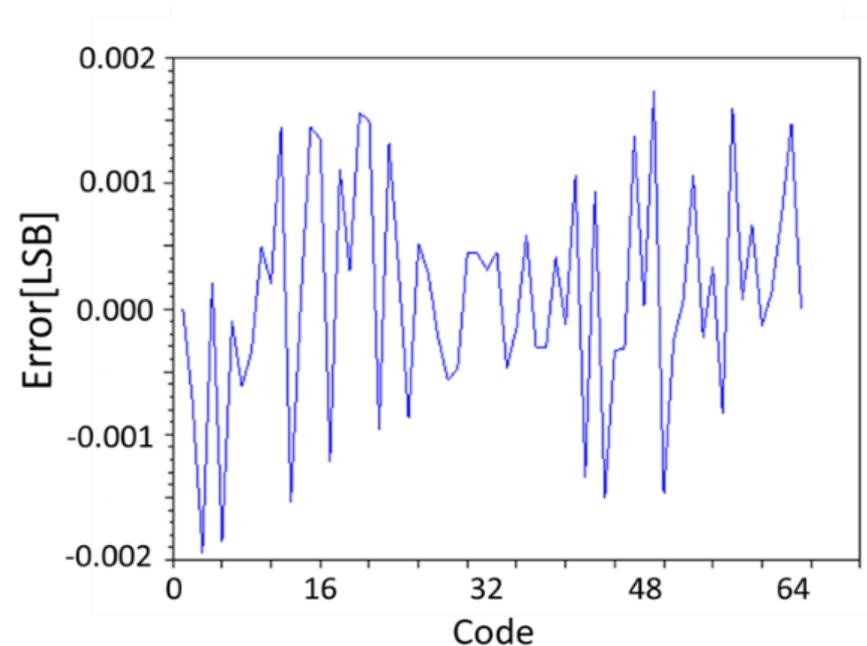
算出されたDNLの誤差

理想的なDNLと比較し、誤差は極めて微小
(± 0.002 LSB)

INLの計算結果・評価



算出されたINL



算出されたINLの誤差

理想的なINLと比較し、誤差は極めて微小
(± 0.0018 LSB)

OUTLINE

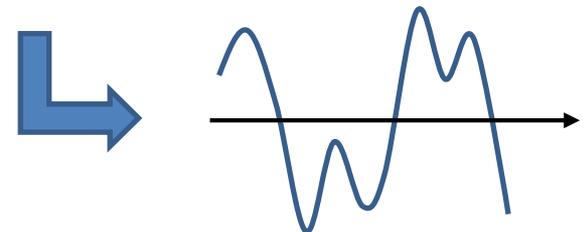
- 研究背景
- 線形性テスト
- マルチトーンテスト信号生成方法
- 微分非線形性・積分非線形性の導出
- シミュレーション結果
- まとめと今後の課題

まとめ

- マルチトーンテスト信号でコード中央部の点数を増加
⇒テスト時間の短縮が期待
- マルチトーンテスト信号からDNL、INLを算出
⇒解析的に解けない入力信号でも数値的に算出可能
- AWGとアナログフィルタによる簡素な実装方法

今後の課題

- どのような信号を入力すれば、どのようなヒストグラムを得られるかという定量的にヒストグラムを制御するための解析
- マルチトーンを入力する際に発生すると考えられる相互変調歪を考慮したシミュレーションと、その解決策の提案
- 他の方式との測定精度の定量的な比較
- 1周期に $f'(t) = 0$ (傾きが0)を2つ以上持つ周期関数 $V = f(t)$ をADCに入力した場合のDNL、INLの導出アルゴリズムの開発



Q&A(1)

Q1 どの程度コストカット出来ると見積もっているか。

A1 テストコストは半導体試験装置の値段だけではなく、テスト時間に大きく依存することになる。テスト時間が短縮出来ればその分テストコストが削減可能。シミュレーション結果的にはサンプル数を約半分に出来たのでテスト時間も半分とまではいかないにしても大きく削減可能と見込んでいる。

Q&A(2)

Q2 マルチトーンの端のとがっている部分は精度が落ちないか

A2 落ちる可能性があるので実際にはADCのフルレンジよりも若干オーバーロードして端を捨て去るのが一般的であるが今回のシミュレーションではしていない。

Q3 マルチトーンの中央部をもっと緩やかにすればもっと時間短縮できるのか

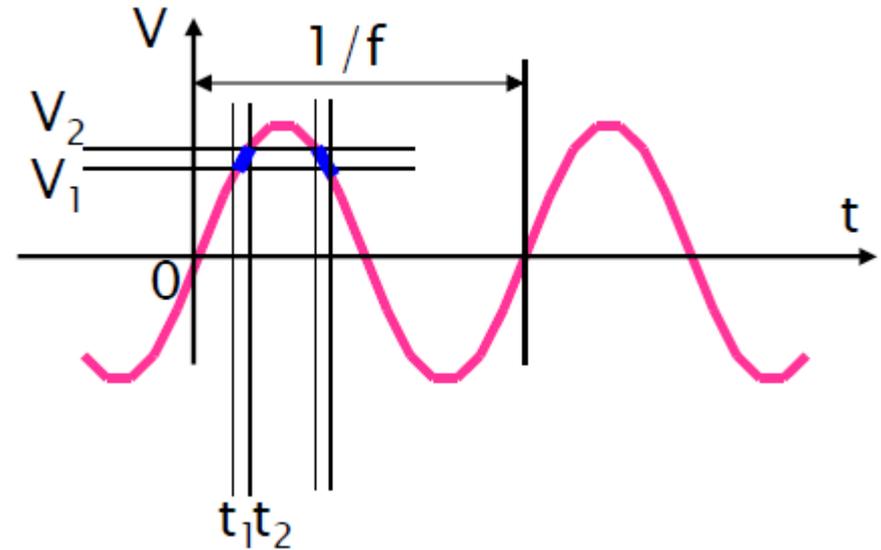
A3 要求仕様によります。所望のヒストグラムを得るために、どのような信号を入力すべきかという解析には至っていないので要求仕様に柔軟に対応できるように今後改良したい。

付録

sin波 確率密度

sin波が電圧 V_1 と V_2 に入る確率 P は

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{2(t_2 - t_1)}{T} \\
 &= \frac{2}{T} \left[\frac{1}{\omega} \left\{ \sin^{-1} \frac{V_2 - V_{OS}}{A} \right\} - \frac{1}{\omega} \left\{ \sin^{-1} \frac{V_1 - V_{OS}}{A} \right\} \right] \\
 &= \frac{2}{\omega T} \left[\left\{ \sin^{-1} \frac{V_2 - V_{OS}}{A} \right\} - \left\{ \sin^{-1} \frac{V_1 - V_{OS}}{A} \right\} \right]
 \end{aligned}$$



※ t_1, t_2 は前ページ参照

と表される。これより、累積確率密度PIを計算する。

$$PI = \sum_{k=0}^i P[k] \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

※DNL, INLを計算する上でPIが必要

sin波 ヒストグラム概形

単純な

$$V(t) = A \sin \omega t + V_{os}$$

の場合、

$$t = \frac{1}{\omega} \left\{ \sin^{-1} \frac{V(t) - V_{os}}{A} \right\}$$

となり、簡単に解ける。

この解は後の確率密度を計算する上で必要。

また、ヒストグラムの概形は

$$\frac{dV}{dt} = A\omega \cos \omega t$$

なので、

$$\begin{aligned} \frac{dt}{dV} &= 1/A\omega \cos \omega t \\ &= 1/\omega \sqrt{A^2 - V^2} \end{aligned}$$

となる。

