

「インパルス応答計測の基礎」

2016. 8. 26

東京電機大学

金田 豊

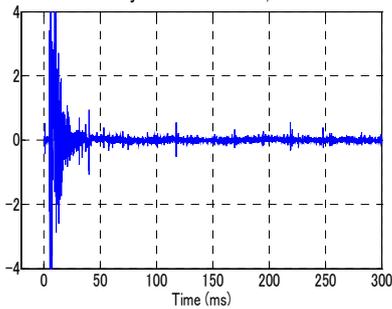
kaneda@c.dendai.ac.jp

http://www.asp.c.dendai.ac.jp/

① 「デジタル信号処理の基礎」 2006.11.17 東京電機大学 金田 豊 kaneda@c.dendai.ac.jp	② 講習概要 (基礎編) 1. アナログ信号とデジタル信号 2. 時間領域と周波数領域 3. 離散フーリエ変換 4. ディジタルフィルタ
③ 講習概要 (発展編) 5. 伝達関数による伝達系のモデル化 6. フィルタ実装の測定法 7. 遅延特性 8. 離散フーリエ変換の性質 9. 実数系における周波数応答の応用	④ 音の伝送とデジタル信号処理 10. 音の伝送とデジタル信号処理 11. 音の伝送とデジタル信号処理 12. 音の伝送とデジタル信号処理 13. 音の伝送とデジタル信号処理 14. 音の伝送とデジタル信号処理 15. 音の伝送とデジタル信号処理
⑤ アナログ信号とデジタル信号 1. AD/D/A変換器の動作原理 2. 量子化誤差 3. DA/D/A変換器の動作原理 4. 量子化雑音 5. アナログ信号とデジタル信号	⑥ アナログ/デジタル-アナログ変換の手続き 1. アナログ信号 2. デジタル信号 3. アナログ信号

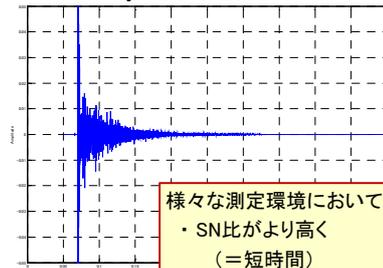
インパルス応答

HRTF by MIT Media Lab., in 1996



インパルス応答測定技術・研究の目標

by TDU in 2013

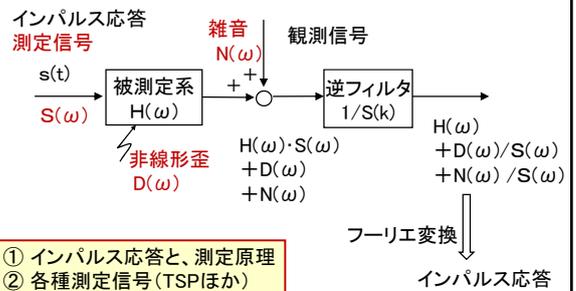


様々な測定環境において
・ SN比がより高く
（＝短時間）
・ 不自然な測定誤差の少ない
インパルス応答測定の実現

目次

1. インパルス信号とインパルス応答
 - 1.1 インパルス信号
 - 1.2 **インパルス応答と測定原理**
 - 1.3 離散時間系のインパルス応答
2. インパルス応答の測定原理
 - 2.1 離散フーリエ変換 (DFT)
 - 2.2 測定信号を用いた測定
3. 代表的測定信号
 - 3.1 測 **いろいろな測定信号**
 - 3.2 測
 - 3.3 TSP
 - 3.3.1 TSPの定義
 - 3.3.2 TSPの時間-周波数特性
 - 3.3.3 TSPの高調波歪
 - 3.4 Log-SS
 - 3.4.1 Log-SSの定義
 - 3.4.2 Log-SSの高調波歪
 - 3.5 M系列信号
 - 3.6 適応形スペクトルを持った信号
 - 3.6.1 雑音白色化信号
4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
 - 4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
 - 4.2 **測定誤差と抑圧方法**
 - 4.3
 - 4.4 同期計算
 - 4.5 非定常雑音
5. 非線形性誤差
 - 5.1 (時不変)非線形性による誤差
 - 5.2 時変性による誤差
 - 5.3 その他の誤差要因
6. 測定の注意点
7. 測 **測定の注意点**
8. 測定時の注意点
 - 8.1 AD・DAなどの注意点
 - 8.2 録音時の雑音
 - 8.3 測定結果の評価
9. 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
10. むすび

講習の概要

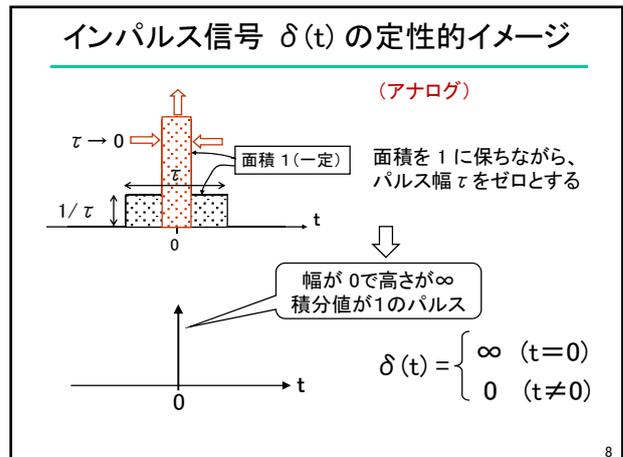


- ① インパルス応答と、測定原理
- ② 各種測定信号 (TSPほか)
- ③ 測定誤差と抑圧方法
- ④ 測定上の注意点 (AD/DA)

目次

1. インパルス信号とインパルス応答	3.6.2 雑音最小化信号
○1.1 インパルス信号	3.6.3 SN比を一定とする信号
1.2 インパルス応答と線形系	3.7 所望スペクトル信号の合成
1.3 離散時間系のインパルス応答	4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
2. インパルス応答の測定原理	4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
2.1 離散フーリエ変換 (DFT)	4.2 帯域制限
2.2 測定信号を用いた測定	4.3 インパルス応答の切り出し
3. 代表的測定信号	4.4 同期加算
3.1 測定信号と測定誤差	4.5 非定常雑音
3.2 測定信号の分類	5. 非線形性誤差
3.3 TSP	5.1 (時不変)非線形による誤差
3.3.1 TSPの定義	5.2 時変性による誤差
3.3.2 TSPの時間-周波数特性	6. その他の誤差要因
3.3.3 TSPの高調波歪	7. 測定上の考慮点
3.4 Log-SS	8. 測定時の注意点
3.4.1 Log-SSの定義	8.1 AD・DA などの注意点
3.4.2 Log-SSの高調波歪	8.2 録音時の雑音
3.5 M系列信号	8.3 測定結果の評価
3.6 適応形スペクトルを持った信号	9. 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
3.6.1 雑音白色化信号	10. むすび

7



インパルス信号(デルタ関数) $\delta(t)$ の数学的定義 [1.1]

参考文献番号(巻末)

定義

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \cdot f(t) dt = f(0)$$

デルタ関数は、ある関数 $f(t)$ に掛けて積分するとその関数の $t=0$ の値を与える「汎関数(超関数)」

9

$\delta(t)$ の性質

定義

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \cdot f(t) dt = f(0)$$

◇ $f(t) = 1$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \cdot 1 dt = \left(\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt \right) = f(0) = 1$$

→ 面積は 1

◇ $f(t) = e^{-j\omega t}$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \cdot e^{-j\omega t} dt = e^{-j\omega \cdot 0} = 1$$

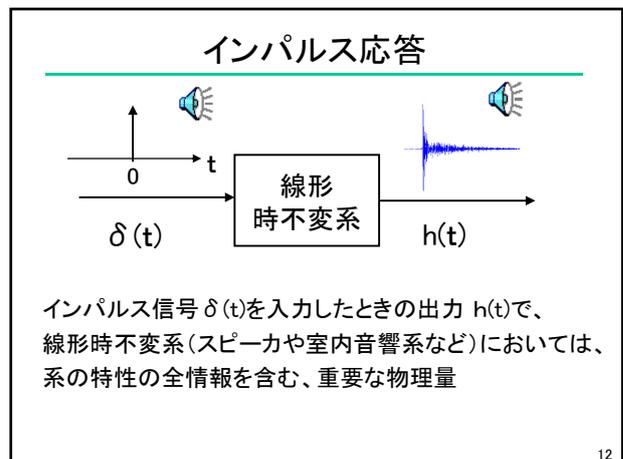
→ $\delta(t)$ のフーリエ変換は 1 (白色スペクトル)

10

目次

1. インパルス信号とインパルス応答	3.6.2 雑音最小化信号
1.1 インパルス信号	3.6.3 SN比を一定とする信号
○1.2 インパルス応答と線形系	3.7 所望スペクトル信号の合成
1.3 離散時間系のインパルス応答	4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
2. インパルス応答の測定原理	4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
2.1 離散フーリエ変換 (DFT)	4.2 帯域制限
2.2 測定信号を用いた測定	4.3 インパルス応答の切り出し
3. 代表的測定信号	4.4 同期加算
3.1 測定信号と測定誤差	4.5 非定常雑音
3.2 測定信号の分類	5. 非線形性誤差
3.3 TSP	5.1 (時不変)非線形による誤差
3.3.1 TSPの定義	5.2 時変性による誤差
3.3.2 TSPの時間-周波数特性	6. その他の誤差要因
3.3.3 TSPの高調波歪	7. 測定上の考慮点
3.4 Log-SS	8. 測定時の注意点
3.4.1 Log-SSの定義	8.1 AD・DA などの注意点
3.4.2 Log-SSの高調波歪	8.2 録音時の雑音
3.5 M系列信号	8.3 測定結果の評価
3.6 適応形スペクトルを持った信号	9. 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
3.6.1 雑音白色化信号	10. むすび

11



線形系とは

$x_1(t)$
 $x_2(t)$

系

$y_1(t)$
 $y_2(t)$

の時、
以下が成立

$c \cdot x_1(t)$
定数倍

系

$c \cdot y_1(t)$
比例

$x_1(t) + x_2(t)$
和

系

$y_1(t) + y_2(t)$
和

13

時不変系とは

時間が経っても特性が変化しない系

$x(t)$

系

$y(t)$

$x(t - \tau)$

系

$y(t - \tau)$

時間 τ の後に、同じ入力を入れれば、
同じ出力が出てくる系

14

線形・時不変系の性質 (1)

$x(t)$

線形
時不変系
 $h(t)$

$y(t)$

系の出力 $y(t)$ は、
入力 $x(t)$ とインパルス応答 $h(t)$ との
(直線)たたみ込み演算の関係にある

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\sigma) \cdot x(t - \sigma) d\sigma$$

たたみ込みの
詳しい説明は
省略

$h(t)$ がわかれば、あらゆる入力 $x(t)$ に対する
出力 $y(t)$ は、計算で求められる

15

たたみ込みのイメージ

16

線形・時不変系の性質 (2)

正弦波を入力した時には、
同じ周波数の正弦波を出力する。 → 証明は
付録 1.2-1

$x(t)$

→

線形
時不変系

→

$y(t)$

その振幅と位相の変化を表したものが
系の周波数特性 $H(\omega)$

17

周波数特性 $H(\omega)$ の定義

入力
 $x(t)$
 $X(\omega)$

線形
時不変系
 $H(\omega)$

$y(t)$
 $Y(\omega)$
 出力

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)}$$

$X(\omega)$: 入力信号のスペクトル(フーリエ変換)
 $Y(\omega)$: 出力信号の " (")

※ 線形系では、 $H(\omega)$ は、 $X(\omega)$ に依存しない

18

周波数特性 $H(\omega)$ の効果

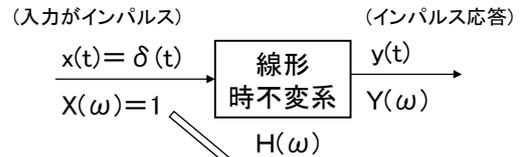


$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \Rightarrow Y(\omega) = H(\omega)X(\omega)$$

入力の周波数成分 $X(\omega)$ は、 $H(\omega)$ 倍される

19

インパルス応答と周波数特性

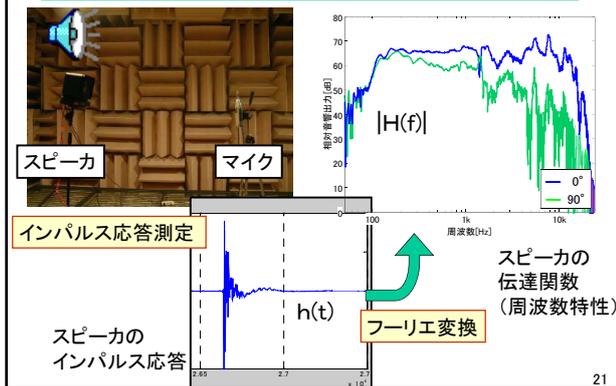


$$Y(\omega) = H(\omega) \cdot X(\omega) = H(\omega)$$

インパルス応答 $y(t)$ のフーリエ変換 $Y(\omega)$ は周波数特性 $H(\omega)$ である

20

インパルス応答と周波数特性の測定例



21

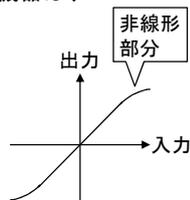
インパルス応答の有用性

- ① 周波数特性 (スピーカ、室内伝達特性、...)
- ② 室内音響評価量 [1.3, 1.4]
残響時間、初期反射音評価量 (D_{50} , C_{80} , ...)
- ③ シミュレーション (建築音響、HRTF (立体音響)、...)
- ④ 制御系設計 [1.2]
音場制御、逆フィルタリング

22

音響系は線形系?

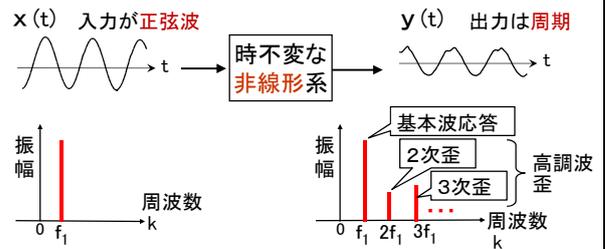
室内音響系、スピーカなどの音響機器は、
ほぼ線形時不変系
しかし、
若干の非線形特性や
時変性が含まれており、
後述するように測定誤差が発生



23

正弦波入力に対する、時不変な非線形系の出力

正弦波を入力した時には、同じ周波数および
その整数倍周波数の成分 (高調波歪) を出力する
*) 整数倍以外の周波数は発生しない



証明は付録

24

測定理論は線形・時不変系が前提

- 以下では、理論的な説明は「線形・時不変系」を前提
- 以下、「線形系」または「系」と略称する
- 非線形特性は、線形時不変系の微小誤差要因と考える

25

線形・時不変系のまとめ

- 線形・時不変系はインパルス応答の前提
- 系の出力 $y(t)$ は、
入力 $x(t)$ とインパルス応答 $h(t)$ との **たたみ込み**
- 出力信号スペクトル $Y(\omega)$ は、
周波数特性 $H(\omega)$ と入力信号スペクトル $X(\omega)$ の **積**
- 周波数特性 $H(\omega)$ は
インパルス応答 $h(t)$ のフーリエ変換
- 非線形系に対する正弦波入力の出力は
高調波歪(倍音)が発生

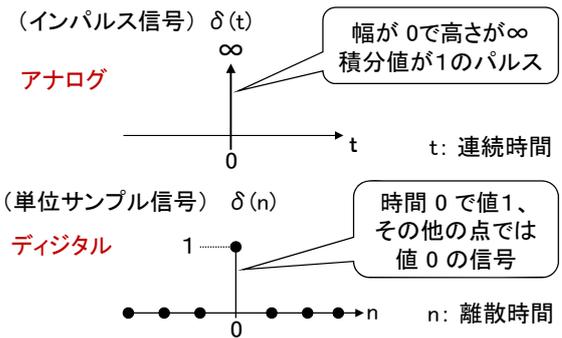
26

目次

- | | |
|--------------------|--|
| 1. インパルス信号とインパルス応答 | 3.6.2 雑音最小化信号 |
| 1.1 インパルス信号 | 3.6.3 SN比を一定とする信号 |
| 1.2 インパルス応答と線形系 | 3.7 所望スペクトル信号の合成 |
| ○1.3 離散時間系のインパルス応答 | 4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法 |
| 2. インパルス応答の測定原理 | 4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル |
| 2.1 離散フーリエ変換(DFT) | 4.2 帯域制限 |
| 2.2 測定信号を用いた測定 | 4.3 インパルス応答の切り出し |
| 3. 代表的測定信号 | 4.4 同期加算 |
| 3.1 測定信号と測定誤差 | 4.5 非定常雑音 |
| 3.2 測定信号の分類 | 5. 非線形性誤差 |
| 3.3 TSP | 5.1 (時不変)非線形による誤差 |
| 3.3.1 TSPの定義 | 5.2 時変性による誤差 |
| 3.3.2 TSPの時間-周波数特性 | 6. その他の誤差要因 |
| 3.3.3 TSPの高調波歪 | 7. 測定上の考慮点 |
| 3.4 Log-SS | 8. 測定時の注意点 |
| 3.4.1 Log-SSの定義 | 8.1 AD・DAなどの注意点 |
| 3.4.2 Log-SSの高調波歪 | 8.2 録音時の雑音 |
| 3.5 M系列信号 | 8.3 測定結果の評価 |
| 3.6 適応形スペクトルを持った信号 | 9. 測定信号が利用できない場合の測定
(最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル) |
| 3.6.1 雑音白色化信号 | 10. むすび |

27

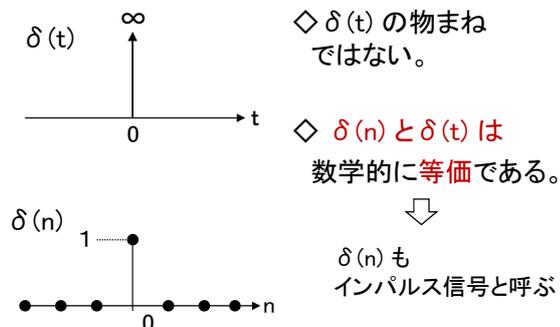
デジタル系のインパルス信号



注: デジタル信号と離散時間信号に関しては付録参照

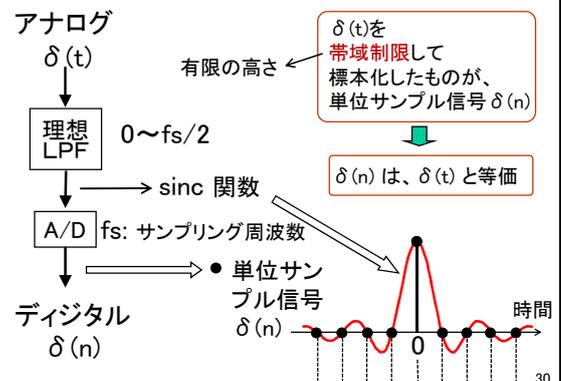
28

$\delta(t)$ と $\delta(n)$



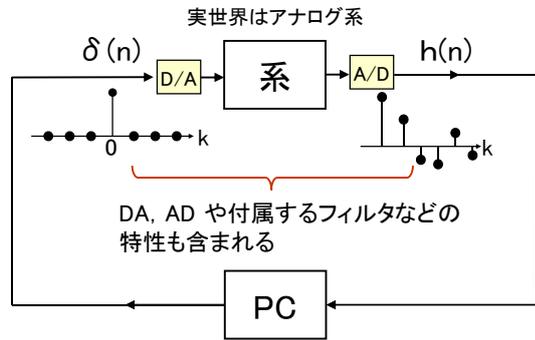
29

$\delta(t)$ と $\delta(n)$ の等価性



30

デジタル系におけるインパルス応答



31

「1章 インパルス信号とインパルス応答」のまとめ

- ・ インパルス信号(デルタ関数)

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \cdot f(t) dt = f(0) \Rightarrow \text{白色性}$$

- ・ インパルス応答
インパルス信号を、線形・時不変系に入力したときの出力
- ・ 周波数特性 $H(\omega)$ は、インパルス応答 $h(t)$ のフーリエ変換 \Rightarrow 等価量
- ・ 離散時間系(デジタル系)のインパルス信号 $\delta(n)$ は単位サンプル信号 $[\dots, 0, 0, 0, 1, 0, 0, \dots]$

32

目次

1. インパルス信号とインパルス応答
 - 1.1 インパルス信号
 - 1.2 インパルス応答と線形系
 - 1.3 離散時間系のインパルス応答
2. インパルス応答の測定原理
 - 2.1 離散フーリエ変換(DFT)
 - 2.2 測定信号を用いた測定
3. 代表的測定信号
 - 3.1 測定信号と測定誤差
 - 3.2 測定信号の分類
 - 3.3 TSP
 - 3.3.1 TSPの定義
 - 3.3.2 TSPの時間-周波数特性
 - 3.3.3 TSPの高調波歪
 - 3.4 Log-SS
 - 3.4.1 Log-SSの定義
 - 3.4.2 Log-SSの高調波歪
 - 3.5 M系列信号
 - 3.6 適応形スペクトルを持った信号
- 3.6.1 雑音白色化信号
- 3.6.2 雑音最小化信号
- 3.6.3 SN比を一定とする信号
- 3.7 所望スペクトル信号の合成
4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
 - 4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
 - 4.2 帯域制限
 - 4.3 インパルス応答の切り出し
 - 4.4 同期加算
 - 4.5 非定常雑音
5. 非線形性誤差
 - 5.1 (時不変)非線形性による誤差
 - 5.2 時変性による誤差
6. その他の誤差要因
7. 測定上の考慮点
8. 測定時の注意点
 - 8.1 AD・DA などの注意点
 - 8.2 録音時の雑音
 - 8.3 測定結果の評価
9. 測定信号が利用できない場合の測定(最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
10. むすび

33

信号と正弦波

すべての信号は、
さまざまな周波数の正弦波の和で出来ている

周期信号の例

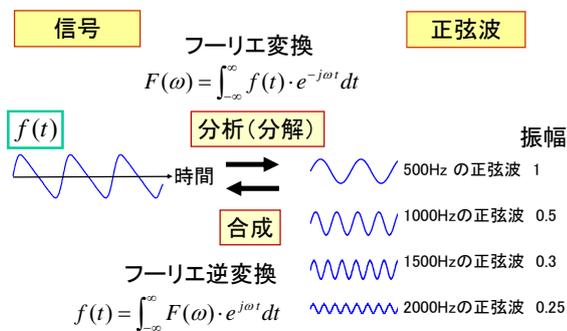
$$f(t) = a_0 + a_1 \sin(2\pi \cdot f_0 t + \theta_1) + a_2 \sin(2\pi \cdot 2f_0 t + \theta_2) + a_3 \sin(2\pi \cdot 3f_0 t + \theta_3) + \dots$$

周波数 f_0	周波数 $2 \cdot f_0$	周波数 $3 \cdot f_0$
振幅は a_1	振幅は a_2	振幅は a_3



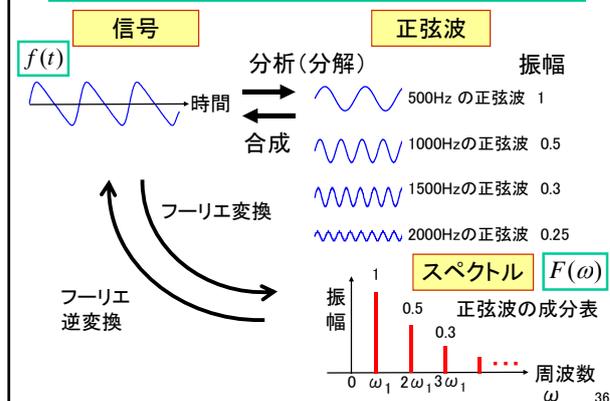
34

信号の「分析」と「合成」



35

信号とスペクトル



36

代表的な時間一周波数変換の分類

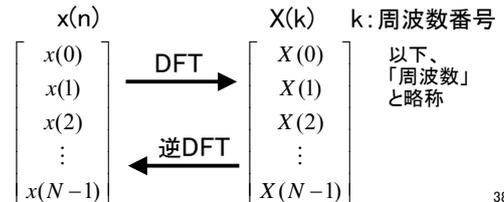
	時間信号	周波数スペクトル	
フーリエ変換	連続	連続	アナログ
フーリエ級数	連続・周期	離散	
z変換	離散	連続・周期	
DFT	離散・周期	離散・周期	デジタル

DFT: Discrete Fourier Transform
(離散フーリエ変換)

37

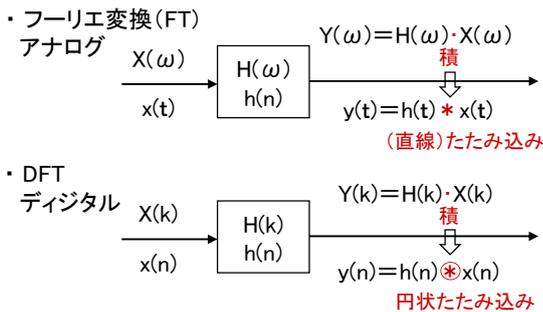
DFT (離散フーリエ変換)

- コンピュータで計算できる**実用的フーリエ変換**
- FFT (Fast Fourier Transform)は DFT を計算するための高速アルゴリズム
- N点の時間信号 $x(n)$ から N点の離散周波数でのスペクトル $X(k)$ を計算
- 時間信号と周波数スペクトルの**周期性**を暗黙に仮定



38

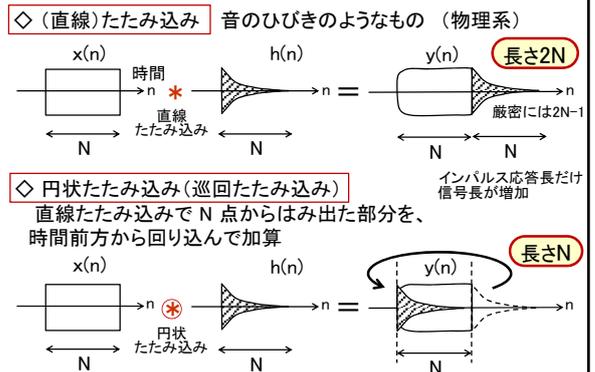
FT スペクトルの積と DFT スペクトルの積



DFTスペクトルの積は、信号の円状たたみ込みに対応

39

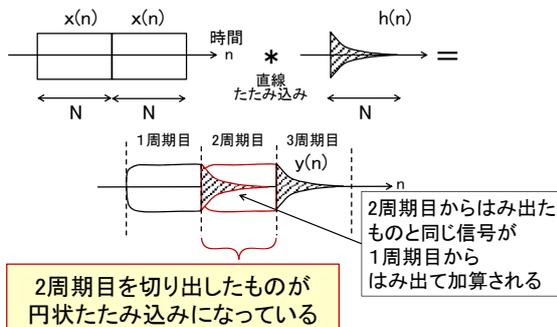
(直線)たたみ込みと円状たたみ込み



40

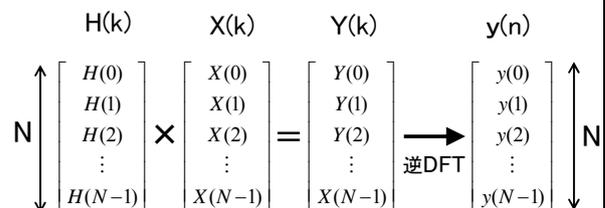
円状たたみ込みの実現

- ◇ 円状たたみ込みは、入力信号を**周期化**し、直線たたみ込みをすることで実現できる



41

DFTスペクトルの積と時間信号



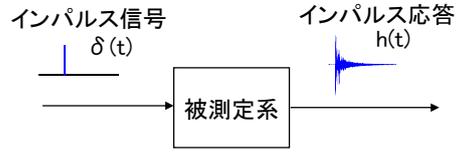
- DFTスペクトルの積 $Y(k)$ を逆DFTした時間信号の長さは N
- N点の時間信号 $x(n)$ と N点の時間信号 $h(n)$ との × 直線たたみ込み ○ 円状たたみ込み

42

目次

1. インパルス信号とインパルス応答	3.6.2 雑音最小化信号
1.1 インパルス信号	3.6.3 SN比を一定とする信号
1.2 インパルス応答と線形系	3.7 所望スペクトル信号の合成
1.3 離散時間系のインパルス応答	4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
2. インパルス応答の測定原理	4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
2.1 離散フーリエ変換(DFT)	4.2 帯域制限
○2.2 測定信号を用いた測定	4.3 インパルス応答の切り出し
3. 代表的測定信号	4.4 同期加算
3.1 測定信号と測定誤差	4.5 非定常雑音
3.2 測定信号の分類	5. 非線形性誤差
3.3 TSP	5.1 (時不変)非線形による誤差
3.3.1 TSPの定義	5.2 時変性による誤差
3.3.2 TSPの時間-周波数特性	6. その他の誤差要因
3.3.3 TSPの高調波歪	7. 測定上の考慮点
3.4 Log-SS	8. 測定時の注意点
3.4.1 Log-SSの定義	8.1 AD・DAなどの注意点
3.4.2 Log-SSの高調波歪	8.2 録音時の雑音
3.5 M系列信号	8.3 測定結果の評価
3.6 適応形スペクトルを持った信号	9. 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
3.6.1 雑音白色化信号	10. むすび

定義どおりの測定(パルス法)の問題点



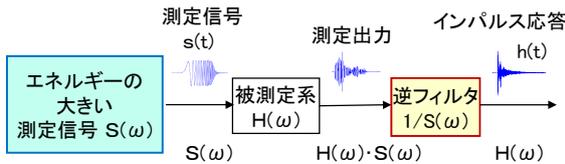
問題点:

- ・パルス信号のエネルギーが小さいのでSN比が悪い
- ・信号の振幅を大きくすると非線形誤差が発生

解決策:

継続時間を長くしてエネルギーを大きくした「測定信号」の利用が有効

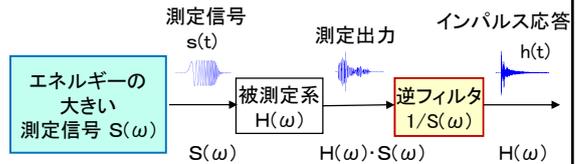
測定信号を用いた測定



【測定系の周波数表現】

- ・出力が入力と周波数特性との積で表される(簡潔)
- ・周波数特性 $H(\omega)$ はインパルス応答 $h(t)$ と等価量
- ・ $H(\omega)$ を得れば、その逆フーリエ変換で $h(t)$ は計算できる
- ・以下、 $H(\omega)$ を求める問題として説明する

測定信号を用いた測定の問題点



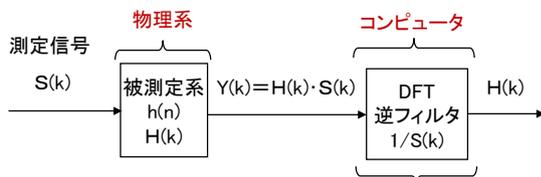
問題点:

- 一般に、逆フィルタ特性 $1/S(\omega)$ は無限時間応答で、正確な逆フィルタは実現できない
- また、フィルタの安定性も保証されていない

解決策:

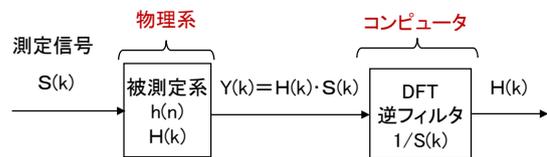
DFT逆フィルタの利用

DFT周波数領域で考える



ただし、 ← 長さ N の安定な逆フィルタが存在
 DFT 逆フィルタは DFTスペクトルの積に対する逆フィルタ
 ⇒ 信号とインパルス応答のDFTスペクトルの積は、円状たたみ込みに対応
 ⇒ しかし、物理系での入出力関係は直線たたみ込み

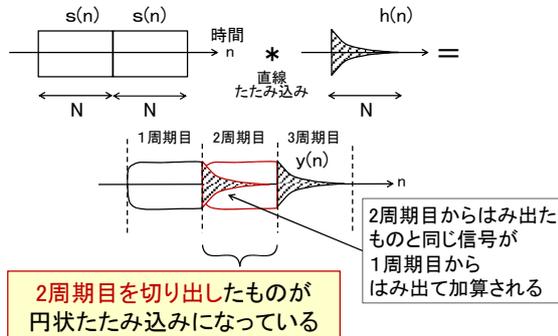
DFT周波数領域で考える



- ⇒ 物理系で円状たたみ込みを実現する必要性
- ⇒ 入力を周期化する

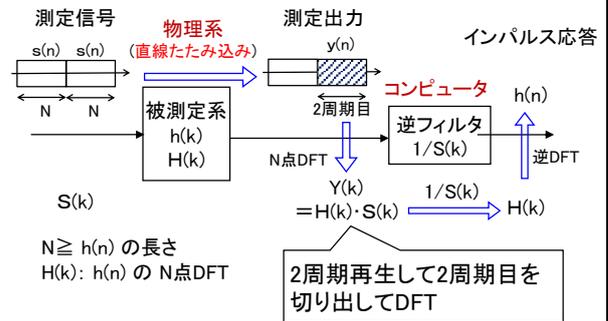
物理系での円状たたみ込みの実現(再)

◇ 円状たたみ込みは入力信号を周期化することで実現できる



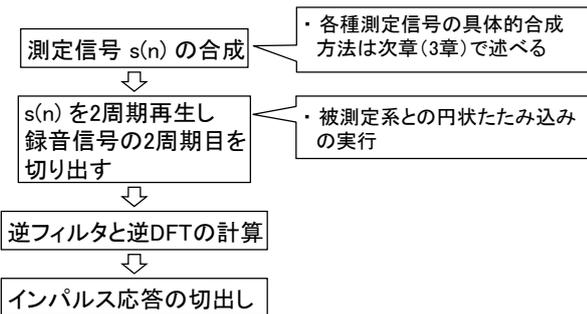
49

DFT逆フィルタを用いた測定



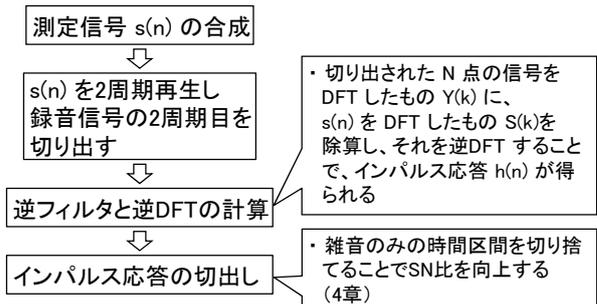
50

測定手順



51

測定手順



52

Q. 2周期再生は必須か？

・ TSP信号は1周期再生で測定する場合も多い

A1. 1周期+Lhでも測定可能

Lh: インパルス応答長

A2. 良好なアナログ逆フィルタの存在するTSPは1周期で測定できるが、いくつかの問題点もある

(7章で説明する)

53

「2章 インパルス応答の測定原理」のまとめ

- ・ DFT(離散フーリエ変換)の積は、円状(巡回)たたみ込みに対応
- ・ 測定信号S(k)を被測定系H(k)に入力し、円状たたみ込みを行った出力H(k)S(k)を、測定信号の逆特性1/S(k)に通すことで、測定系の特性H(k)は得られる。
- ・ 物理系で円状たたみ込みを行うためには、測定信号s(n)を2周期入力して、2周期目を切り出して、DFTする

54

目次

1. インパルス信号とインパルス応答
 - 1.1 インパルス信号
 - 1.2 インパルス応答と線形系
 - 1.3 離散時間系のインパルス応答
2. インパルス応答の測定原理
 - 2.1 離散フーリエ変換 (DFT)
 - 2.2 測定信号を用いた測定
3. 代表的測定信号
 - 3.1 測定信号と測定誤差
 - 3.2 測定信号の分類
 - 3.3 TSP
 - 3.3.1 TSPの定義
 - 3.3.2 TSPの時間-周波数特性
 - 3.3.3 TSPの高調波歪
 - 3.4 Log-SS
 - 3.4.1 Log-SSの定義
 - 3.4.2 Log-SSの高調波歪
 - 3.5 M系列信号
 - 3.6 適応形スペクトルを持った信号
 - 3.6.1 雑音白色化信号
 - 3.6.2 雑音最小化信号
 - 3.6.3 SN比を一定とする信号
 - 3.7 所望スペクトル信号の合成
4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
 - 4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
 - 4.2 帯域制限
 - 4.3 インパルス応答の切り出し
 - 4.4 同期加算
 - 4.5 非定常雑音
5. 非線形性誤差
 - 5.1 (時不変)非線形による誤差
 - 5.2 時変性による誤差
6. その他の誤差要因
7. 測定上の考慮点
8. 測定時の注意点
 - 8.1 AD・DAなどの注意点
 - 8.2 録音時の雑音
 - 8.3 測定結果の評価
9. 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
10. むすび

55

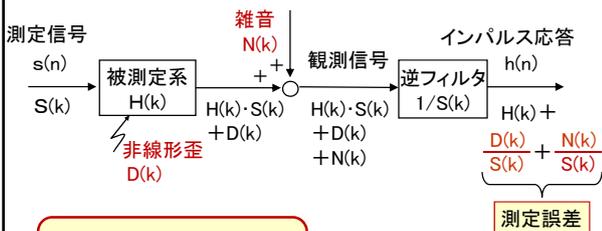
理想的測定環境



どのような測定信号 $S(k)$ ($S(k) \neq 0$) を用いても、正確に $H(k)$ を求めることができる

56

実環境での測定



$D(k)/S(k)$: **非線形誤差**
 $N(k)/S(k)$: **雑音性誤差** と呼ぶことにする

57

測定信号の周波数特性

測定信号の周波数特性 $S(k)$

$$S(k) = |S(k)| \cdot e^{j\phi(k)}$$

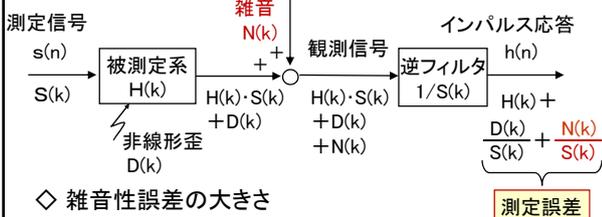
振幅特性

位相特性

複素数

58

雑音性誤差



◇ 雑音性誤差の大きさ

$$\frac{|N(k)|}{|S(k)|} = \frac{|N(k)|}{|S(k)|}$$

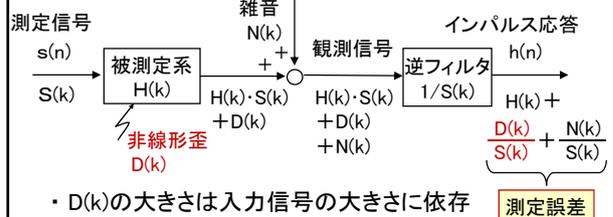
測定信号の振幅特性に依存

- ・ 測定信号が大きいかほど雑音性誤差は小さい
- ・ 振幅の周波数特性が重要

位相特性には依存しない

59

非線形誤差



- ・ $D(k)$ の大きさは入力信号の大きさに依存
正しくは、 $D(S(k))$ と表すべき

一般に、測定信号波形の振幅を大きくすると非線形誤差は増加

- ・ 非線形誤差の時間一周波数特性は特徴的であり $S(k)$ の位相特性(群遅延特性)の影響が重要

60

測定信号と測定誤差

- ・ **雑音性誤差**の大きさは、
測定信号 $S(k)$ の **振幅特性**に依存
- ・ **非線形誤差**の現れ方は、 $S(k)$ の **位相特性**に依存



適切な測定誤差の選択が重要

61

目次

1. インパルス信号とインパルス応答	3.6.2 雑音最小化信号
1.1 インパルス信号	3.6.3 SN比を一定とする信号
1.2 インパルス応答と線形系	3.7 所望スペクトル信号の合成
1.3 離散時間系のインパルス応答	4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
2. インパルス応答の測定原理	4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
2.1 離散フーリエ変換(DFT)	4.2 帯域制限
2.2 測定信号を用いた測定	4.3 インパルス応答の切り出し
3. 代表的測定信号	4.4 同期加算
3.1 測定信号と測定誤差	4.5 非定常雑音
○ 3.2 測定信号の分類	5. 非線形性誤差
3.3 TSP	5.1 (時不変)非線形による誤差
3.3.1 TSPの定義	5.2 時変性による誤差
3.3.2 TSPの時間-周波数特性	6. その他の誤差要因
3.3.3 TSPの高調波歪	7. 測定上の考慮点
3.4 Log-SS	8. 測定時の注意点
3.4.1 Log-SSの定義	8.1 AD・DAなどの注意点
3.4.2 Log-SSの高調波歪	8.2 録音時の雑音
3.5 M系列信号	8.3 測定結果の評価
3.6 適応形スペクトルを持った信号	9. 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
3.6.1 雑音白色化信号	10. むすび

62

測定信号の分類 (1)

◇ 波形(位相特性)の種類による分類

- ・ **掃引正弦波 (SS: Swept Sine、チャープ信号)**
時間とともに周波数が上昇(下降)する正弦波信号。
周波数の時間的変化特性により、いくつかの種類。
例) TSP、Log-SS (ピンクTSP) など
- ・ **疑似雑音 (PN: Pseud Noise、PR: Pseud Random)**
ランダム雑音のような波形を持った信号。
例) M系列信号、有色疑似雑音 など

SS: 掃引正弦波
PN: 疑似雑音

63

測定信号の分類 (2)

◇ パワースペクトル(振幅特性)による分類

		パワースペクトル $ S(k) ^2$	例
固定形	白色	C_1	TSP、M系列
	$1/f$ (ピンク)	$C_2 \cdot 1/k$	Log-SS (ピンクTSP)
適応形	雑音白色化 (NW) Noise Whitening	$C_3 \cdot P_N(k)$	MN-SS MN-PN CSN-SS など
	雑音最小化 (MN) Minimum Noise	$C_4 \cdot \sqrt{P_N(k)}$	
	SN比一定 (GSN) Constant SN	$C_5 \cdot H(k) ^2 / P_N(k)$	

C_1, C_2, C_3, \dots : 定数, $P_N(k)$: 雑音のパワースペクトル, $|H(k)|$: 系の振幅応答

64

望ましい 測定用信号の条件 (一般論)

- 1) **大きなエネルギー**を持つ信号
→ SN比向上
- 2) ただし、ある特定の時間にエネルギーが集中すると、系の非線形が発生するので、
ほぼ一定の振幅で持続する信号
- 3) 測定対象となる**周波数成分**が、
欠落無く含んでいる信号
- 4) 扱いやすく、性質の良い信号

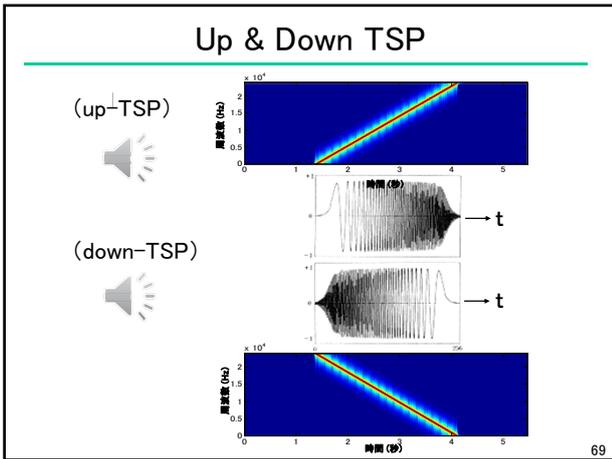
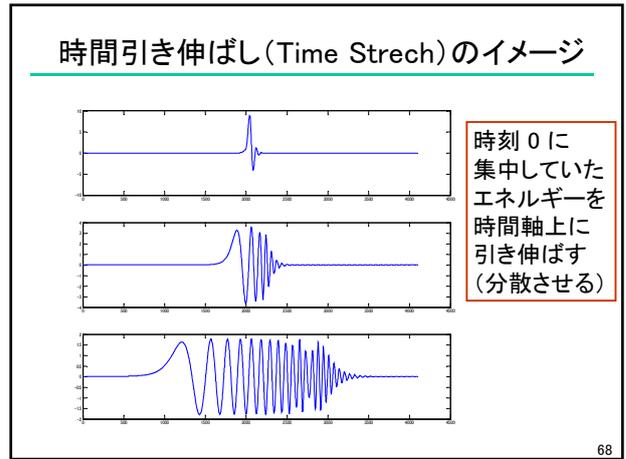
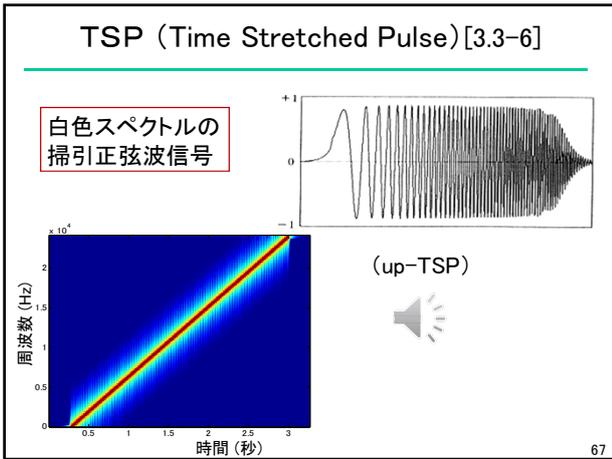
SSやPNはこれらの条件を満足

65

目次

1. インパルス信号とインパルス応答	3.6.2 雑音最小化信号
1.1 インパルス信号	3.6.3 SN比を一定とする信号
1.2 インパルス応答と線形系	3.7 所望スペクトル信号の合成
1.3 離散時間系のインパルス応答	4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
2. インパルス応答の測定原理	4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
2.1 離散フーリエ変換(DFT)	4.2 帯域制限
2.2 測定信号を用いた測定	4.3 インパルス応答の切り出し
3. 代表的測定信号	4.4 同期加算
3.1 測定信号と測定誤差	4.5 非定常雑音
3.2 測定信号の分類	5. 非線形性誤差
3.3 TSP	5.1 (時不変)非線形による誤差
○ 3.3.1 TSPの定義	5.2 時変性による誤差
3.3.2 TSPの時間-周波数特性	6. その他の誤差要因
3.3.3 TSPの高調波歪	7. 測定上の考慮点
3.4 Log-SS	8. 測定時の注意点
3.4.1 Log-SSの定義	8.1 AD・DAなどの注意点
3.4.2 Log-SSの高調波歪	8.2 録音時の雑音
3.5 M系列信号	8.3 測定結果の評価
3.6 適応形スペクトルを持った信号	9. 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
3.6.1 雑音白色化信号	10. むすび

66



TSP の定義式 (DFTスペクトル)

・ N点のDFT周波数成分が次式で定義される

$$\text{up_TSP}(k) = \begin{cases} \exp(-j 2 \pi J (k/N)^2) & k=0,1,\dots,N/2 \\ \text{up_TSP}(N-k)^* & k=N/2+1, \dots, N-1 \end{cases}$$

J: 実効長 (偶数) *: 複素共役

$$\text{down_TSP}(k) = \begin{cases} \exp(+j 2 \pi J (k/N)^2) & k=0,1,\dots,N/2 \\ \text{down_TSP}(N-k)^* & k=N/2+1, \dots, N-1 \end{cases}$$

70

TSP の定義式の解釈

$$S(k) = |S(k)| \cdot e^{-j\alpha \left(\frac{k}{N}\right)^2}$$

$\alpha = 2\pi J$

振幅特性は、1 (白色スペクトル)

位相特性は、離散周波数 (k/N) の二乗に比例

※ 離散周波数 (k/N) に関しては付録 3.3.1-1 参照

71

TSP の定義式の解釈 (2)

時間 τ の遅延特性を表すスペクトル

$$e^{-j\omega\tau} \Rightarrow e^{-j2\pi f\tau}$$

$(\int \delta(t-\tau) \cdot e^{-j\omega t} dt)$

$\tau = a \cdot f$

a : 定数

$f = k/N$

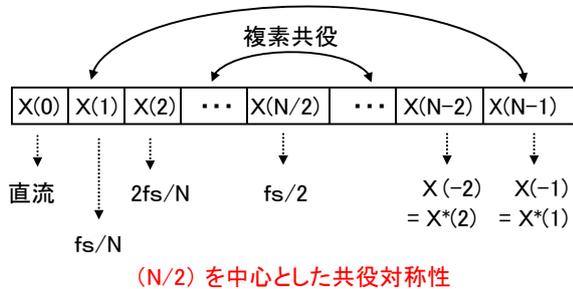
$$e^{-j2\pi a f^2}$$

$$e^{-j2\pi a (k/N)^2}$$

72

実時間関数の DFT スペクトル

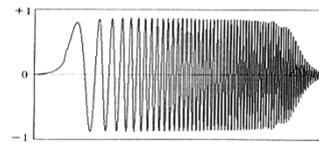
時間信号が実数の時、そのDFTスペクトルは以下の性質を持つ



時間波形へ変換

$$\text{up_TSP}(k) = \begin{cases} \exp(-j 2 \pi J (k/N)^2) & k=0,1,\dots,N/2 \\ \text{up_TSP}(N-k)^* & k=N/2+1, \dots, N-1 \end{cases}$$

↓ 逆DFT



74

TSP の 定義式 (DFTスペクトル)

- N点のDFT周波数成分が次式で定義される

$$\text{up_TSP}(k) = \begin{cases} \exp(-j 2 \pi J (k/N)^2) & k=0,1,\dots,N/2 \\ \text{up_TSP}(N-k)^* & k=N/2+1, \dots, N-1 \end{cases}$$

J: 実効長 (偶数) *: 複素共役

$$\text{down_TSP}(k) = \begin{cases} \exp(+j 2 \pi J (k/N)^2) & k=0,1,\dots,N/2 \\ \text{down_TSP}(N-k)^* & k=N/2+1, \dots, N-1 \end{cases}$$

- 離散周波数 (k/N) の二乗に比例した位相成分
- 時間波形は、これを逆DFTして得られるN点の信号

75

TSP信号の MATLAB プログラム

$$\text{up_TSP}(k) = \begin{cases} \exp(-j 2 \pi J (k/N)^2) & k=0,1,\dots,N/2 \\ \text{up_TSP}(N-k)^* & k=N/2+1, \dots, N-1 \end{cases}$$

```
N=2^16; J=N/2; k=0:N/2;
up_TSP(1:N/2+1) = exp(-j*2*pi*J*(k/N).^2);
up_TSP(N/2+2:N) = conj( up_TSP(N/2:-1:2) );
up_tsp = real( ifft(up_TSP) );
```

- 時間波形振幅は $\sqrt{2/J}$
 \Rightarrow 振幅を A_s とするには、スペクトルを $A_s/\sqrt{2/J}$ 倍
 (証明 \rightarrow 付録3.3.1-2)

76

TSP の 逆関数

- ◇ TSP の逆関数は、
逆TSP (ITSP: Inverse TSP) と呼ばれる

$$\begin{aligned} \text{up_TSP}(k) &= \exp(-j 2 \pi J (k/N)^2) \\ \text{と} \\ \text{down_TSP}(k) &= \exp(+j 2 \pi J (k/N)^2) \\ \text{を乗算すると} & \text{1 となる。} \end{aligned}$$

↓

$$\text{up-TSP と down-TSP は、} \quad \frac{1}{\text{up_TSP}(k)} = \text{down_TSP}(k)$$

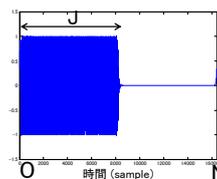
お互いに逆関数の関係

77

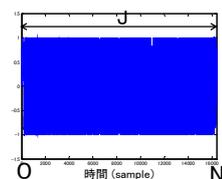
実効長 J

$$e^{-j 2 \pi J (k/N)^2}$$

実効長 $J = N/2$



実効長 $J = N$



- 雑音抑圧量は J に比例 ($J \leq N$) (詳細後述)
- $J = (3/4)N \sim (1/2)N$ 程度とすることが多い
 (7章参照) (要検討)

78

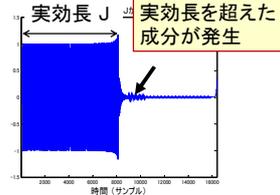
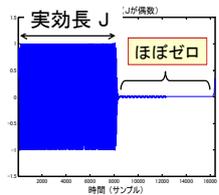
Jが偶数であることの必要性

$k=N/2$ (上限周波数)で、

$$e^{-j2\pi J(k/N)^2} \implies e^{-j\pi J/2}$$

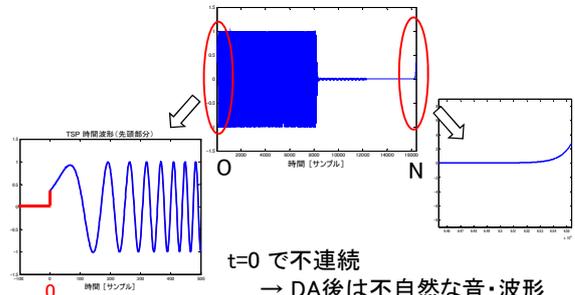
Jが偶数なら
スペクトルは実数

Jが偶数でない場合
スペクトルは複素数
→ 強制的実数化が必要



79

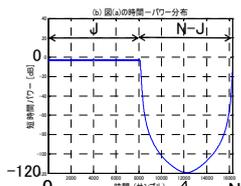
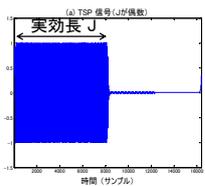
TSP の立ち上がり



$t=0$ で不連続
→ DA後は不自然な音・波形
(2周期目以降は連続だが)

80

TSP の短時間パワー分布 [3.4]

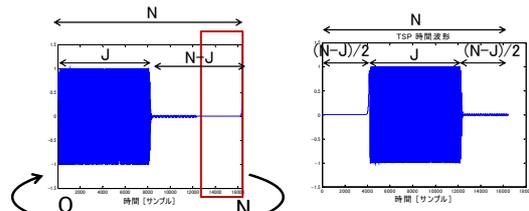


$(N-J)/2$ 付近で
パワー最小

*) $J=N/2$ の場合

81

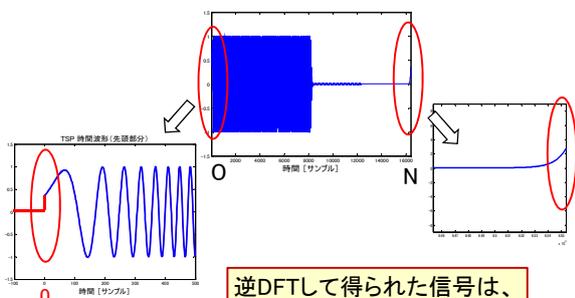
円状シフト



円状シフトの適正量は $(N-J)/2$

82

逆DFTした信号と円状シフト

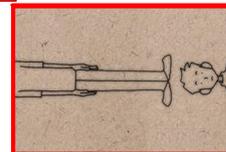


逆DFTして得られた信号は、
左端と右端が連続している

83

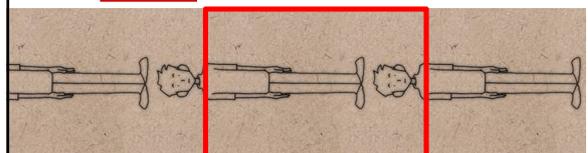
円状シフトと周期信号

円状シフト 不自然な現象?



DFTした信号は、
暗黙のうちに
周期信号なので

周期信号 の1周期分を見ていると考えれば、自然な結果



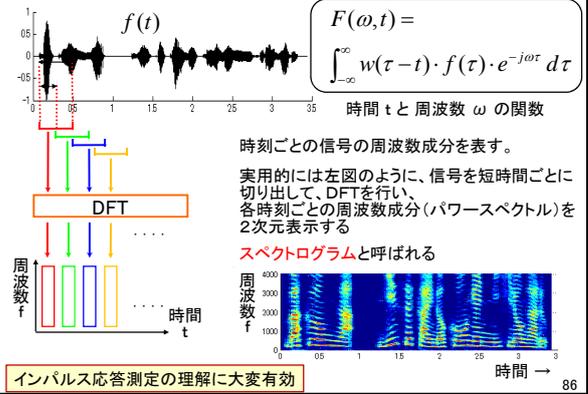
84

目次

1. インパルス信号とインパルス応答
 - 1.1 インパルス信号
 - 1.2 インパルス応答と線形系
 - 1.3 離散時間系のインパルス応答
2. インパルス応答の測定原理
 - 2.1 離散フーリエ変換 (DFT)
 - 2.2 測定信号を用いた測定
3. 代表的測定信号
 - 3.1 測定信号と測定誤差
 - 3.2 測定信号の分類
 - 3.3 TSP
 - 3.3.1 TSPの定義
 - 3.3.2 TSPの時間-周波数特性
 - 3.3.3 TSPの高調波歪
 - 3.4 Log-SS
 - 3.4.1 Log-SSの定義
 - 3.4.2 Log-SSの高調波歪
 - 3.5 M系列信号
 - 3.6 適応形スペクトルを持った信号
 - 3.6.1 雑音白色化信号
 - 3.6.2 雑音最小化信号
 - 3.6.3 SN比を一定とする信号
 - 3.6.4 3.7 所望スペクトル信号の合成
4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
 - 4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
 - 4.2 帯域制限
 - 4.3 インパルス応答の切り出し
 - 4.4 同期加算
 - 4.5 非定常雑音
5. 非線形性誤差
 - 5.1 (時不変)非線形による誤差
 - 5.2 時変性による誤差
6. その他の誤差要因
7. 測定上の考慮点
8. 測定時の注意点
 - 8.1 AD・DAなどの注意点
 - 8.2 録音時の雑音
 - 8.3 測定結果の評価
9. 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
10. むすび

85

信号の時間-周波数特性



86

TSPの時間-周波数特性を数式で求める

◇ TSP の周波数特性

$$e^{-j 2\pi J (k/N)^2}$$

◇ 位相特性 $\phi(k)$

$$\phi(k) = -2\pi J (k/N)^2$$

◇ 群遅延特性 $\tau(k)$

$$\tau(k) = -\frac{d}{d\Omega} \phi(k) \quad \Omega = 2\pi (k/N)$$

87

TSP の群遅延

$$\Omega = 2\pi (k/N) \quad d\Omega = 2\pi (dk/N)$$

群遅延特性 $\tau(k)$

$$\begin{aligned} \tau(k) &= -\frac{d}{d\Omega} \phi(k) = -\frac{N}{2\pi} \frac{d}{dk} \phi(k) \\ &= -\frac{N}{2\pi} \frac{d}{dk} (-2\pi J (k/N)^2) \\ &= \frac{2J}{N} k \end{aligned}$$

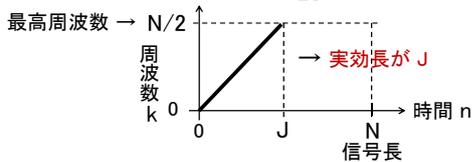
88

TSP の時間-周波数特性

掃引正弦波の時間-周波数特性は、群遅延特性に対して、周波数を時間の関数として表すことで求められる。

$$\text{群遅延特性 } \tau(k) = \frac{2J}{N} k$$

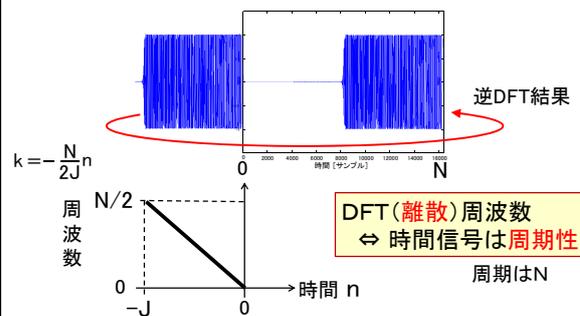
$$\tau \rightarrow n \quad \text{時間-周波数特性 } k = \frac{N}{2J} n \quad \begin{cases} n=0 \text{ で } k=0 \\ n=J \text{ で } k=N/2 \end{cases}$$



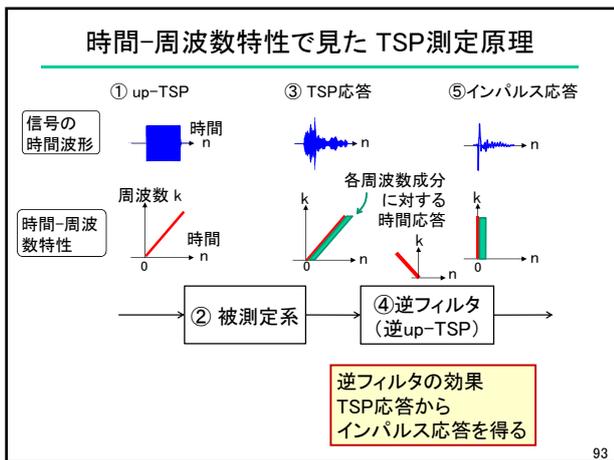
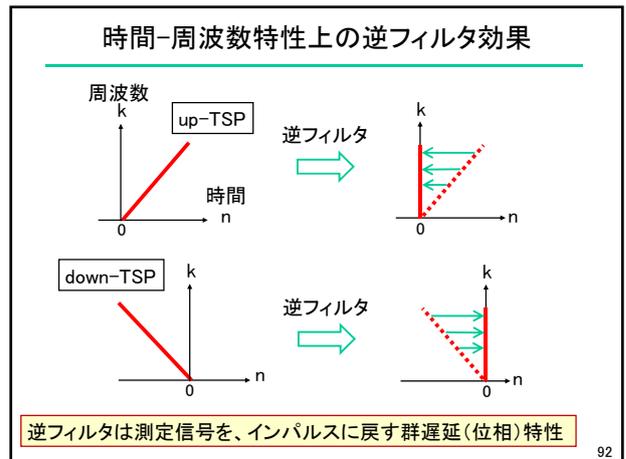
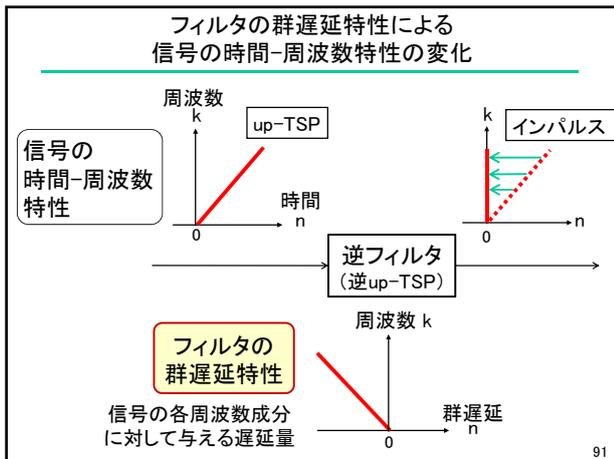
89

down-TSP

$$e^{+j2\pi J (k/N)^2} \rightarrow \text{位相が正} \rightarrow \text{時間進み特性}$$



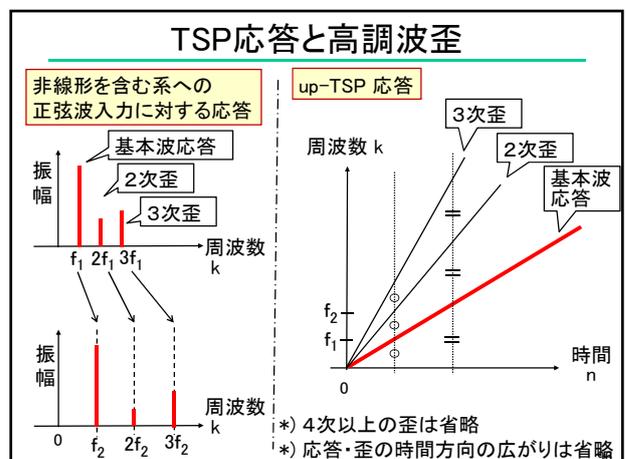
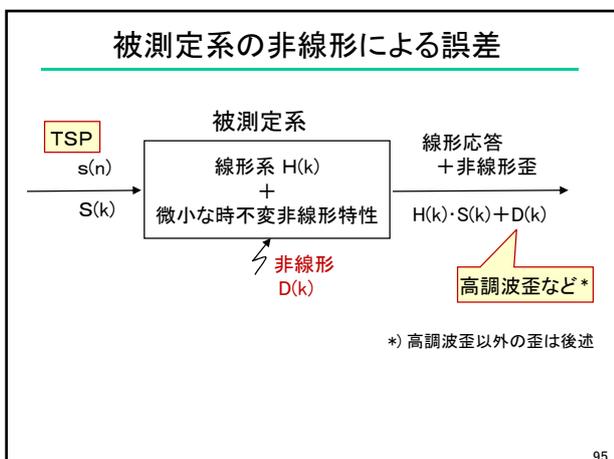
90

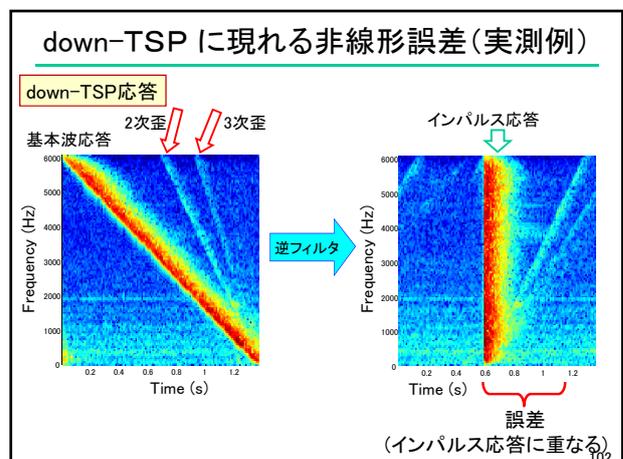
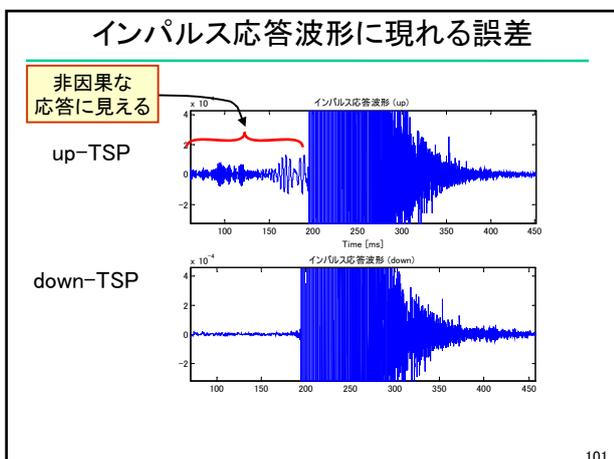
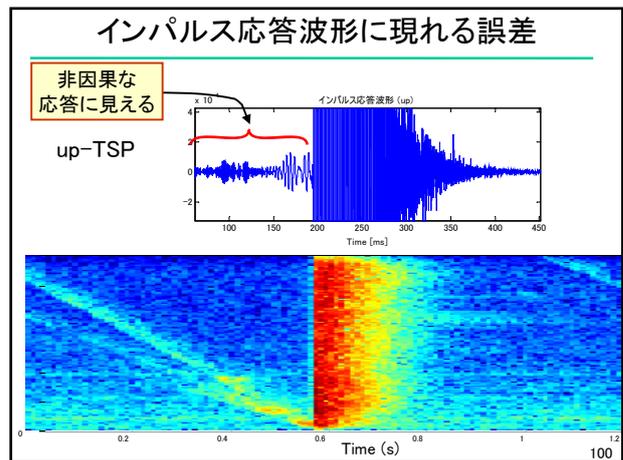
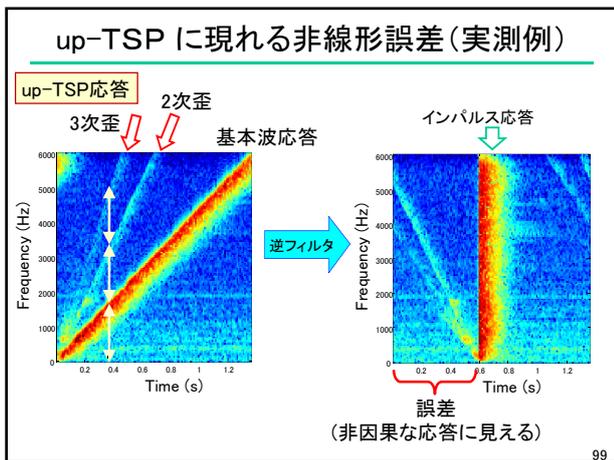
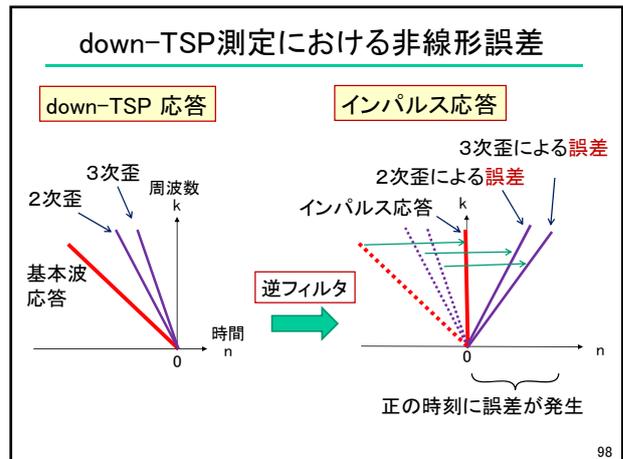
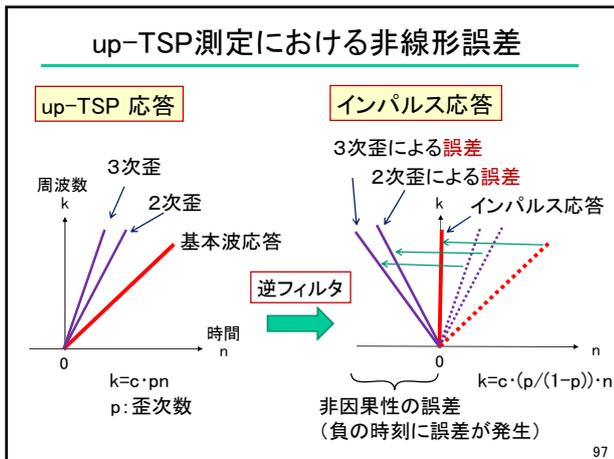


目次

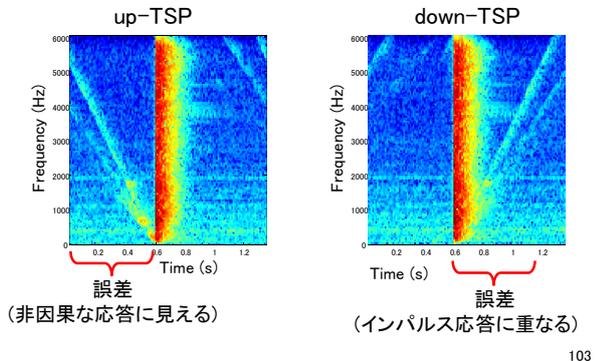
- インパルス信号とインパルス応答
 - インパルス信号
 - インパルス応答と線形系
 - 離散時間系のインパルス応答
- インパルス応答の測定原理
 - 離散フーリエ変換(DFT)
 - 測定信号を用いた測定
- 代表的測定信号
 - 測定信号と測定誤差
 - 測定信号の分類
- TSP
 - TSPの定義
 - TSPの時間-周波数特性
 - TSPの高調波歪
- Log-SS
 - Log-SSの定義
 - Log-SSの高調波歪
- M系列信号
- 適応形スペクトルを持った信号
 - 雑音白色化信号
 - 雑音最小化信号
 - SN比を一定とする信号
 - 所望スペクトル信号の合成
- 雑音性誤差と誤差抑圧方法
 - 測定信号のエネルギーとスペクトル
 - 帯域制限
 - インパルス応答の切り出し
- 非線形性誤差
 - (時不変)非線形による誤差
 - 時変性による誤差
- その他の誤差要因
- 測定上の考慮点
- 測定時の注意点
 - AD・DAなどの注意点
 - 録音時の雑音
 - 測定結果の評価
- 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
- むすび

94

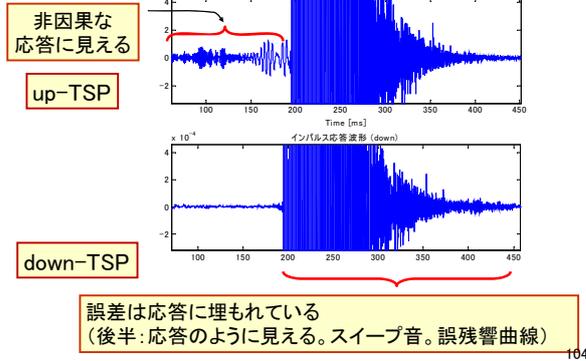




TSPを用いたインパルス応答測定結果に現れる非線形誤差 (時間-周波数特性)



TSPを用いたインパルス応答測定結果に現れる非線形誤差 (時間波形)



TSPと非線形誤差

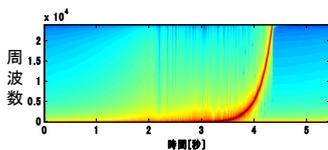
- up-TSP
 - 短所: インパルス応答の負の時間方向に非線形誤差が出現するので、測定信号レベルを小さくして非線形誤差を小さくしないと不自然
 - 長所: インパルス応答本体には高調波歪の影響なし
 - down-TSP では、
 - 短所: インパルス応答の中に高調波歪の影響が含まれ、目立たないが、残響曲線などには悪影響
 - 長所: インパルス応答の立ち上がり時間が明確
- これらの誤差を許容するかどうかは、用途による。

目次

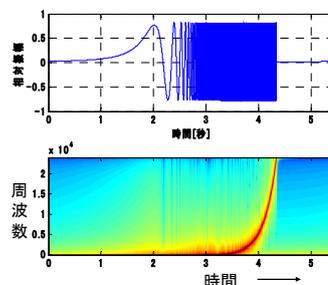
- インパルス信号とインパルス応答
 - インパルス信号
 - インパルス応答と線形系
 - 離散時間系のインパルス応答
- インパルス応答の測定原理
 - 離散フーリエ変換(DFT)
 - 測定信号を用いた測定
- 代表的測定信号
 - 測定信号と測定誤差
 - 測定信号の分類
 - TSP
 - TSPの定義
 - TSPの時間-周波数特性
 - TSPの高調波歪
 - Log-SS
 - AD・DAなどの注意点
 - Log-SSの定義
 - Log-SSの高調波歪
 - M系列信号
 - 適応形スペクトルを持った信号
 - 雑音白色化信号
 - 雑音最小化信号
 - SN比を一定とする信号
 - 所望スペクトル信号の合成
- 雑音性誤差と誤差抑圧方法
 - 測定信号のエネルギーとスペクトル
 - 帯域制限
 - インパルス応答の切り出し
 - 同期加算
 - 非定常雑音
- 非線形性誤差
 - (時不変)非線形による誤差
 - 時変性による誤差
- その他の誤差要因
- 測定上の考慮点
- 測定時の注意点
 - AD・DAなどの注意点
 - 録音時の雑音
 - 測定結果の評価
- 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
- むすび

Log-SS [3.7-11]

- Log-SS 複数の呼び名
 - Log Swept Sine
 - ピンク TSP
 - Log-TSP
 - ESS, E-sweep
 - Exponentially Swept Sine
 - Exponential Sine Sweep



Log-SS とは



• 「対数周波数」が時間に比例
 • 「周波数」は時間の指数関数

$$f = e^{\alpha t}$$

$$\log(f) = \alpha t$$

- 2大長所
- 低周波域のSN比改善効果
 - 高調波歪の分離測定・除去

低周波域の掃引時間が長い
 → エネルギー大

Log-SS の設計式

DFT周波数での設計式は、次式

$$Log_SS(k) = \begin{cases} 1 & k=0 \\ \frac{1}{\sqrt{k}} \cdot \exp[-jak \cdot \log(k)] & 1 \leq k \leq N/2 \\ Log_SS(N-k)^* & N/2 < k < N \end{cases}$$

$$a = \frac{J \cdot \pi}{(N/2) \cdot \log(N/2)} \quad J: \text{整数} \quad *: \text{複素共役}$$

log は自然対数

- 藤本の式[3.8]に基づくが、up-SS (位相部分が負)である。upの方が高調波歪成分の分離が良い(後述)。
- ピンク雑音と同様に、周波数成分が -3dB/oct で低下しているので藤本はピンク-TSPと呼んでいる。

109

Log-SS 設計式の説明

$$\underbrace{\frac{1}{\sqrt{k}}}_{\text{振幅}} \cdot \underbrace{e^{-ja k \cdot \log(k)}}_{\text{位相}}$$

$$a = \frac{J\pi}{(N/2) \cdot \log(N/2)}$$

↑
k=N/2 で位相項を πのJ(整数)倍とするための定数

パワーが周波数 k に逆比例いわゆる1/f 特性 (-3dB/oct.)

微分したら log(k)+1 群遅延が log(k) 特性 (後述)

110

逆Log-SS

逆Log-SS (I Log-SS) のDFT周波数は、

$$I Log_SS(k) = \frac{1}{Log_SS(k)} = \sqrt{k} \cdot \exp[jak \cdot \log(k)] \quad 0 \leq k \leq N/2$$

逆Log-SS 波形

- TSP と違って、up-Log-SSの逆特性 ≠ down-Log-SS 時間軸を反転しても逆関数とはならない(振幅特性が違う)

111

時間-周波数特性の計算

$$\tau(k) = -\frac{d}{d\Omega} \phi(k) = -\frac{d}{d\Omega} [-ak \cdot \log(k)] \quad d\Omega = 2\pi(d k/N)$$

$$= \frac{N}{2\pi} a \frac{d}{dk} [k \cdot \log(k)] = \frac{N}{2\pi} \frac{J \cdot \pi}{(N/2) \log(N/2)} (\log(k)+1)$$

$$= \frac{J}{\log(N/2)} (\log(k)+1)$$

周波数 k	時間 n (= τ(k))
0	-∞
1/e	0
1	J/log(N/2)
N/2	J + J/log(N/2)

112

Log-SSの時間-周波数特性

周波数 k	時間 n
0	-∞
1/e	0
1	J/log(N/2)
N/2	J + J/log(N/2)

$$\tau(k) = \frac{J}{\log(N/2)} (\log(k)+1)$$

$$k = e^{\left\{ \frac{\log(N/2)}{J} n - 1 \right\}}$$

指数関数

* J は k=1~N/2 までの時間
* k=1/e 以下の周波数は時間軸上で多重に折り返しされる

(N=64, J=32 の例)

113

超低周波成分の多重折り返し

- スピーカの帯域外なので通常測定時は影響は小さい(?)

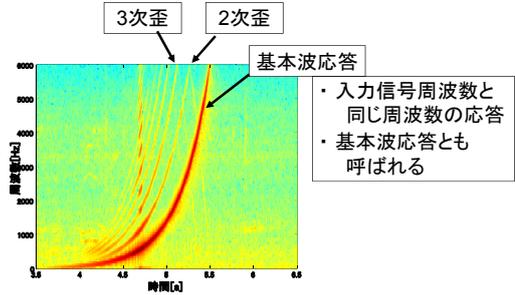
114

目次

1. インパルス信号とインパルス応答
 - 1.1 インパルス信号
 - 1.2 インパルス応答と線形系
 - 1.3 離散時間系のインパルス応答
2. インパルス応答の測定原理
 - 2.1 離散フーリエ変換 (DFT)
 - 2.2 測定信号を用いた測定
3. 代表的測定信号
 - 3.1 測定信号と測定誤差
 - 3.2 測定信号の分類
 - 3.3 TSP
 - 3.3.1 TSPの定義
 - 3.3.2 TSPの時間-周波数特性
 - 3.3.3 TSPの高調波歪
 - 3.4 Log-SS
 - 3.4.1 Log-SSの定義
 - 3.4.2 Log-SSの高調波歪
 - 3.5 M系列信号
 - 3.6 適応形スペクトルを持った信号
 - 3.6.1 雑音白色化信号
 - 3.6.2 雑音最小化信号
 - 3.6.3 SN比を一定とする信号
 - 3.7 所望スペクトル信号の合成
4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
 - 4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
 - 4.2 帯域制限
 - 4.3 インパルス応答の切り出し
 - 4.4 同期加算
 - 4.5 非定常雑音
5. 非線形性誤差
 - 5.1 (時不変)非線形による誤差
 - 5.2 時変性による誤差
6. その他の誤差要因
7. 測定上の考慮点
8. 測定時の注意点
 - 8.1 AD・DAなどの注意点
 - 8.2 録音時の雑音
 - 8.3 測定結果の評価
9. 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
10. むすび

115

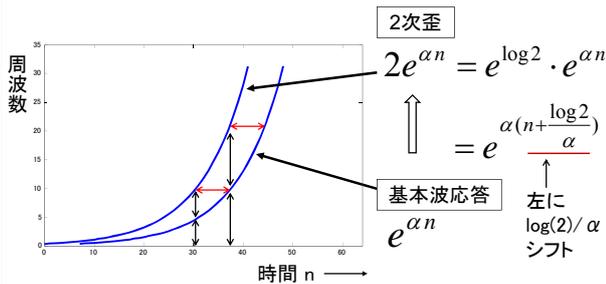
Log-SS に現れる非線形誤差 (高調波歪)



高調波歪の時間-周波数特性は、基本波応答と同一形状
⇒ 次頁

116

指数関数の性質



一般に、指数関数を p 倍した曲線は、
左に $\log(p)/\alpha$ 平行移動した信号

117

高調波歪の時間周波数特性

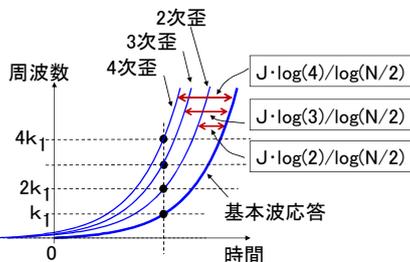
基本波応答 $k_1 = e^{-1} e^{\left\{ \frac{\log(N/2)}{J} n \right\} \alpha}$ $\left[p e^{\alpha n} = e^{\alpha \left(n + \frac{\log p}{\alpha} \right)} \right]$

p次歪 $k_p = p \cdot k_1 = e^{-1} e^{\left\{ \frac{\log(N/2)}{J} \left(n + \frac{J \cdot \log(p)}{\log(N/2)} \right) \right\} \alpha}$

基本波応答を $\frac{J \cdot \log(p)}{\log(N/2)}$ 左に平行移動した信号

118

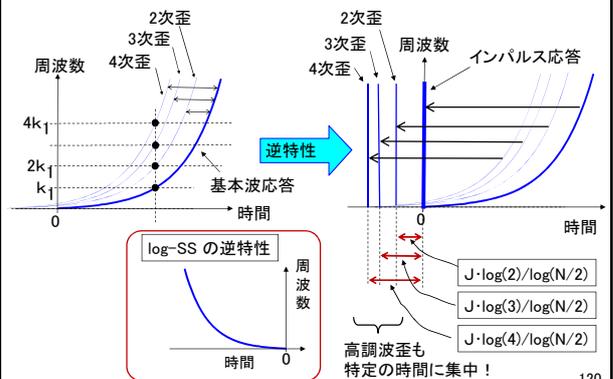
高調波歪の時間-周波数特性



基本波応答を $\frac{J \cdot \log(p)}{\log(N/2)}$ 左に平行移動した信号

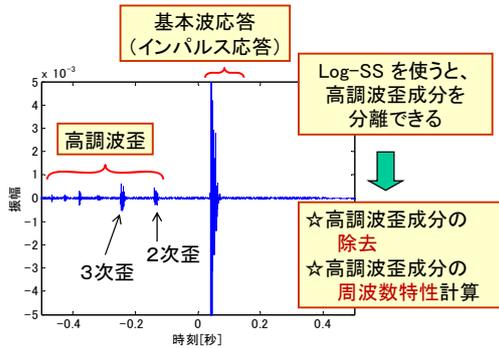
119

Log-SSによる高調波歪の分離測定



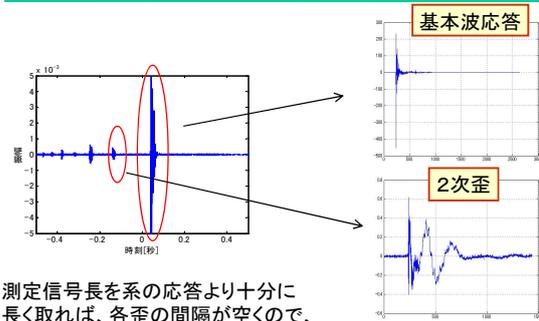
120

測定例: 高調波歪の分離測定



121

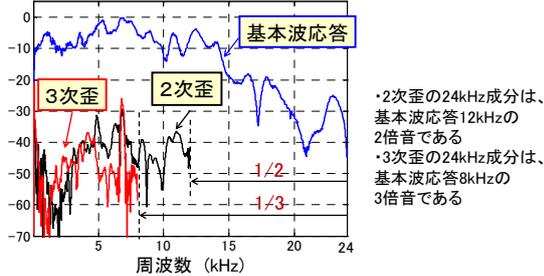
高調波歪の周波数特性測定の例



測定信号長を系の応答より十分に長く取れば、各歪の間隔が空くので、各歪を個別に切り出すことができる。

122

高調波歪の周波数特性

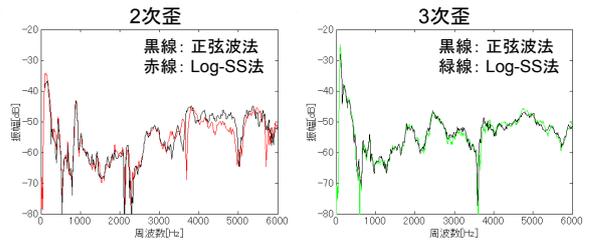


切り出した各高調波歪波形を DFT することで、歪の周波数特性が得られる。ただし、p次歪の横軸(周波数軸)は、1/p に圧縮して表示する必要がある。

123

高調波歪の測定結果の評価 [3.11.1] [3.10]

正弦波法との比較

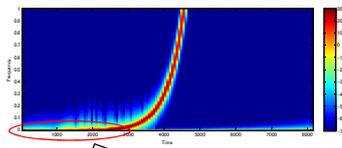


・おおむね一致
・低域でやや差
・スピーカの時変性も要考慮

・切り出しの際の誤差に注意 (長さ、端点)
・高調波以外の歪に注意

124

(藤本の)標準型 Log-SSの課題



測定対象外の周波数成分の掃引時間が長い (特にNが大きい場合)

開始-終了周波数を指定した掃引

J は、 $k=1$ すなわち、 f_s/N [Hz] から $f_s/2$ [Hz] までの長さ。
 $f_s=48\text{kHz}$ 、 $N=2^{16}$ の場合、 $0.7\text{Hz}\sim 24000\text{Hz}$ までの掃引。
全長の約 1/2 が 100Hz 以下

125

若干の補足 (詳細は今回省略)

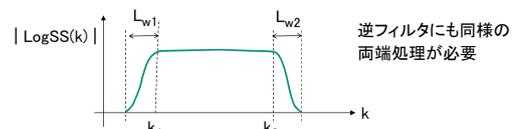
◇ k_1 から k_2 まで、実効長 J での掃引正弦波

$$\text{LogSS}(k) = \begin{cases} 1 & \text{for } k=0 \\ \left(\frac{1}{\sqrt{k}}\right) \exp\left[-\frac{2\pi}{N} \cdot \frac{1}{a} (\log(k)-1-b) \cdot k + C_1 \cdot \pi\right] & \text{for } 1 < k \leq N/2 \\ \text{LogSS}(N-k)^* & \text{for } N/2 < k < N \end{cases}$$

$$a = \log[(k_2/k_1)^{1/J}] \quad b = \log(k_1)$$

C_1 は $k=N/2$ で π の整数倍とするための定数

*) 両端の処理が必要



◇ 時間軸での設計もできる [3.7.1][3.11]

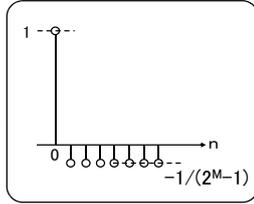
126

M系列信号の性質

周期化 M系列信号 $m_p(n)$ の自己相関の1周期分は、

$$\phi(n) = \frac{1}{2^M - 1} \sum_{i=0}^{2^M - 2} m_p(i) \cdot m_p(i+n)$$

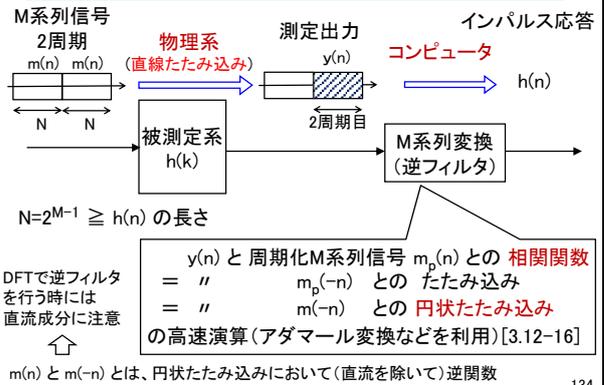
$$= \begin{cases} 1 & n = 0 \\ -1/(2^M - 1) & n \neq 0 \end{cases}$$



$1/(2^M-1)$ の直流成分を付加すれば、インパルス信号
 \Rightarrow 1周期分をDFTすれば、(直流を除いて)白色信号
 直流成分はほぼゼロ

133

M系列信号を用いた測定



134

M系列信号の特徴

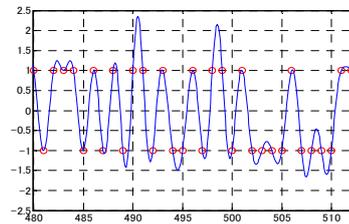
- DFTスペクトルが(直流を除き)白色
- ハードウェア(シフトレジスタ)での発生が容易*1)
- 逆フィルタが加減算のみで行える低演算量のアルゴリズム*1)がある(アダマール変換*2))
- 低波高率(クレストファクタ)*3)

- *1 コンピュータの能力が低かった時代の利点
- *2 現在のコンピュータではFFTの方が高速
- *3 現在のDA($\Sigma \Delta$ 方式)では成立しない(次頁)

135

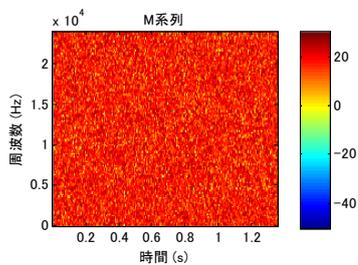
帯域制限されたM系列信号

デジタル値では ± 1 のM系列信号であっても、DAして(低域通過フィルタを通して)アナログ信号にすると、振幅は ± 2 を超える
 \Rightarrow 低波高率信号ではない、
 \Rightarrow デジタル値を小さくしておかないと、DA時にクリップ(後述)



136

M系列の時間-周波数特性

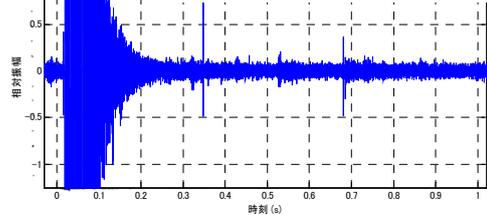


- 時間-周波数成分の関係はランダム
- 全時間帯に多数の周波数成分がランダムに生起

137

M系列に対する非線形誤差の例

スピーカなどの非線形誤差としてパルス状の誤差成分が発生する



残響曲線の劣化につながるため、音量を大きくできない

138

一般的な擬似雑音

DFT周波数での設計式は、次式

$$PN(k) = \begin{cases} \sqrt{P_N(k)} \cdot \exp[-j2\pi\theta_N(k)] & 1 \leq k \leq N/2 \\ PN(N-k)^* & N/2 < k < N \end{cases}$$

$\theta_N(k)$: 0~1の一樣乱数 *: 複素共役

- $P_N(k)$: 任意のスペクトル(白色擬似雑音、有色擬似雑音)
- 非線形誤差がパルス的でない
- 低波高率化が可能(後述)



※ M系列より白色擬似雑音の方が有利と考えられる

139

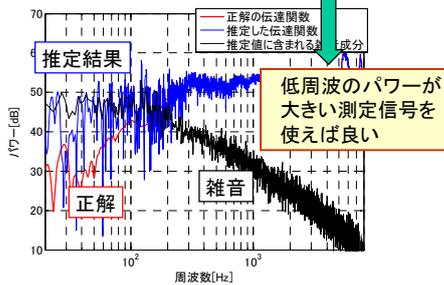
目次

- インパルス信号とインパルス応答
 - インパルス信号
 - インパルス応答と線形系
 - 離散時間系のインパルス応答
- インパルス応答の測定原理
 - 離散フーリエ変換(DFT)
 - 測定信号を用いた測定
- 代表的測定信号
 - 測定信号と測定誤差
 - 測定信号の分類
 - TSP
 - TSPの定義
 - TSPの時間-周波数特性
 - TSPの高調波歪
 - Log-SS
 - Log-SSの定義
 - Log-SSの高調波歪
 - M系列信号
- 適応形スペクトルを持った信号
 - 雑音白色化信号
 - 雑音最小化信号
 - SN比を一定とする信号
 - 所望スペクトル信号の合成
- 雑音性誤差と誤差抑圧方法
 - 測定信号のエネルギーとスペクトル
 - 帯域制限
 - インパルス応答の切り出し
 - 同期加算
 - 非定常雑音
- 非線形性誤差
 - (時不変)非線形性による誤差
 - 時変性による誤差
- その他の誤差要因
- 測定上の考慮点
- 測定時の注意点
 - AD・DAなどの注意点
 - 録音時の雑音
 - 測定結果の評価
- 測定信号が利用できない場合の測定(最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
- おわりに

140

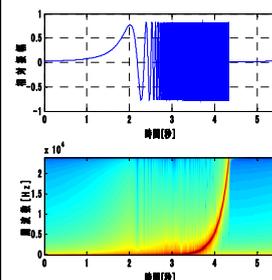
一般的な室内騒音

室内騒音は低周波成分が大きいため、TSPやM系列などの白色信号による測定では、低周波でのSN比が劣化



141

Log-SS信号



- 低周波のパワーが大きい(1/f 特性)
- 低周波のSN比を改善

- 高周波のパワーが小さく、高周波成分のSN比が低下
- 低周波以外にも大きな雑音成分を持つ雑音には不適

いろいろな種類の雑音に対して理論的な裏付けのある測定信号が望ましい

142

適応形スペクトルを持つ測定信号

測定環境に存在する雑音のスペクトルを事前測定し、それに適したスペクトルを持つ測定信号の利用



低域の強い雑音、高域の強い雑音、など、雑音のスペクトルに応じた、適切な雑音抑圧効果

143

代表的な適応形スペクトル

	測定信号の パワースペクトル $ S(k) ^2$	測定信号の例
雑音白色化 NW: Noise Whitening	$C_3 \cdot P_N(k)$	MN-SS MN-PN CSN-SS、など
雑音最小化 MN: Minimum Noise	$C_4 \cdot \sqrt{P_N(k)}$	
SN比一定 CSN: Constant SN	$C_5 \cdot P_N(k) / \hat{H}(k) ^2$	

- 雑音は定常雑音を仮定 C_3, C_4, C_5 : 定数
- $P_N(k)$ は雑音のスペクトル(数秒程度のデータを事前測定)
- $|\hat{H}(k)|$ は系の振幅応答の推定値
- MN と CSN は筆者らの提案(宣伝活動?)

144

3.6.1 雑音白色化信号 (NW: Noise Whitening) [3.19]

雑音の大きな周波数帯域は、
測定信号のパワーを大きくして雑音成分を抑圧



雑音のパワースペクトル $P_N(k)$ に
比例したパワースペクトルを持つ測定信号

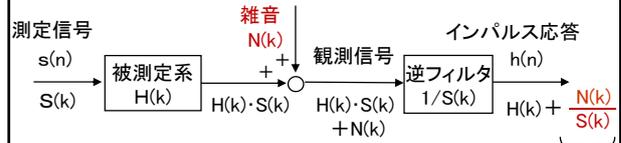
$$|S(k)|^2 = C_3 \cdot P_N(k) \quad C_3: \text{定数}$$

測定信号の
パワースペクトル

雑音の
パワースペクトル

145

雑音性誤差のパワースペクトル



◇ 雑音性誤差のパワースペクトル $P_{N1}(k)$ 雑音性誤差

$$P_{N1}(k) = E \left\{ \left| \frac{N(k)}{S(k)} \right|^2 \right\} = \frac{E \{ |N(k)|^2 \}}{|S(k)|^2} = \frac{P_N(k)}{|S(k)|^2}$$

$E \{ \cdot \}$: 期待値 $P_N(k)$: 観測時の雑音のパワースペクトル

146

雑音白色化信号の効果

$$|S(k)|^2 = C_3 \cdot P_N(k)$$

◇ 雑音性誤差のパワースペクトル $P_{N1}(k)$

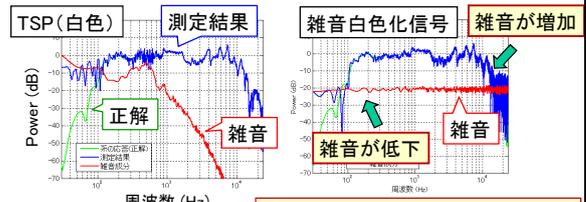
$$P_{N1}(k) = \frac{P_N(k)}{|S(k)|^2} = \frac{P_N(k)}{C_3 \cdot P_N(k)} = \frac{1}{C_3}$$

誤差のスペクトルは周波数 k によらない
→ 白色化

147

シミュレーションの例

◇ 騒音環境での周波数特性測定



実は、雑音の合計は減少していない

$$\sum_{k=0}^{N-1} P_{N1}(k) \quad \text{証明は4章}$$

148

3.6.2 雑音最小化信号 (MN: Minimum Noise) [3.21]

< 拘束条件 >

直感ではなく定量的最適化

信号エネルギー (各周波数成分のパワーの総和) E_S

$$E_S = \sum_{k=0}^{N-1} |S(k)|^2 = \text{一定}$$

波形のパワーと
継続時間が一定

< 評価量 >

雑音性誤差のエネルギー E_{N1} (各周波数の雑音パワーの総和)

$$E_{N1} = \sum_{k=0}^{N-1} P_{N1}(k) = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{P_N(k)}{|S(k)|^2}$$

を最小化する測定信号のパワースペクトル $|S(k)|^2$ を求める。

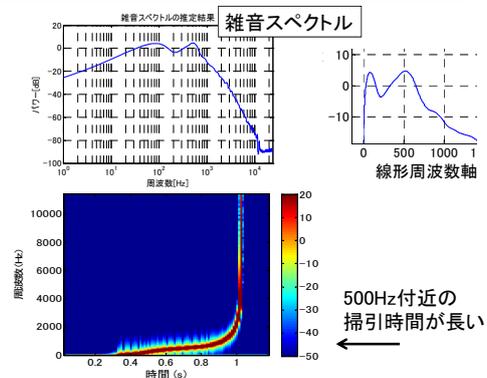
< 最小化信号 >

$$|S(k)|^2 = C_4 \cdot \sqrt{P_N(k)} \quad C_4: \text{定数}$$

(証明は文献[3.21])

149

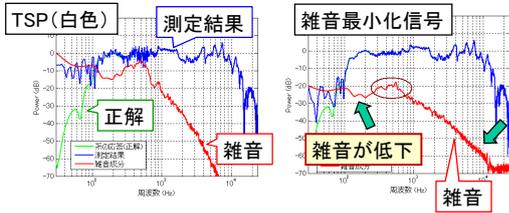
雑音最小化信号の時間-周波数特性の例



500Hz付近の
掃引時間が長い

150

雑音最小化信号の効果



151

雑音抑圧量の計算例 [4.2]

	Hoth	騒音A	騒音B	騒音C
白色 (TSP)	0 [dB]	0	0	0
雑音白色化	-0.1	0.8	-2.2	0.4
1/f (log-SS)	8.8	17.8	18.1	9.2
雑音最小化	10.9	19.7	20.3	15.0

白色の結果を基準(0dB)

雑音白色化(WN)は白色(TSP)と同じ

log-SSは、雑音最小化に近い場合もある

(理由)

騒音スペクトルが $P_N(k) = 1/k^2$ の時、雑音最小化信号のパワースペクトルは

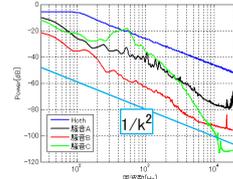
$$|S(k)|^2 = C_4 \cdot \sqrt{P_N(k)} = C_4 \cdot 1/k$$

振幅スペクトルは

$$|S(k)| = \sqrt{C_4} / \sqrt{k}$$

となり、log-SS と一致

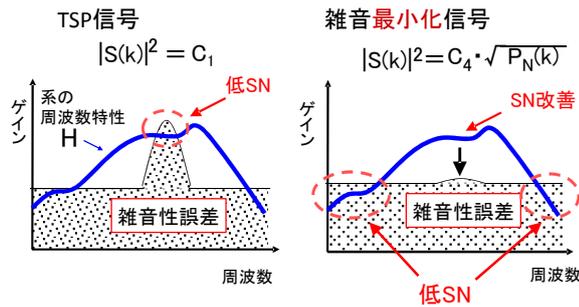
室内騒音には、 $1/k^2$ 特性の騒音も多い



★ Log-SS は、パワーが $1/k^2$ 特性の雑音を最小化

152

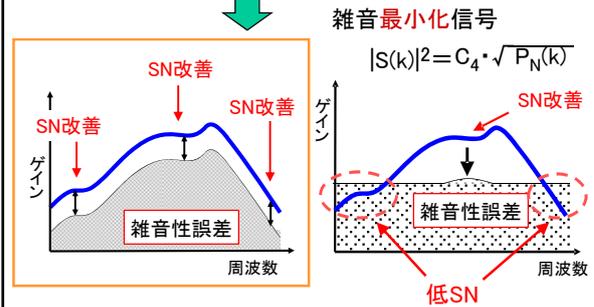
雑音最小化の効果と課題



雑音が大きき部分は抑圧されるが、系の周波数応答が小さい部分の低SN比は改善されない

153

SN比を一定とした測定



• SN比を一定とすれば、広い帯域で一定品質の測定結果
• 過剰な高SN比を避けることで測定時間を短縮

154

3.6.3 SN比を一定とする測定信号 (CSN: Constant SN) [3.22]

測定結果 $H(k) + \frac{N(k)}{S(k)}$

$$\text{SN比} = \frac{|H(k)|^2}{E\{|N(k)|^2\} / |S(k)|^2} = \frac{|H(k)|^2}{P_N(k)} |S(k)|^2$$

これより、

$$|S(k)|^2 = C_5 \cdot \frac{P_N(k)}{|H(k)|^2}$$

とすれば、

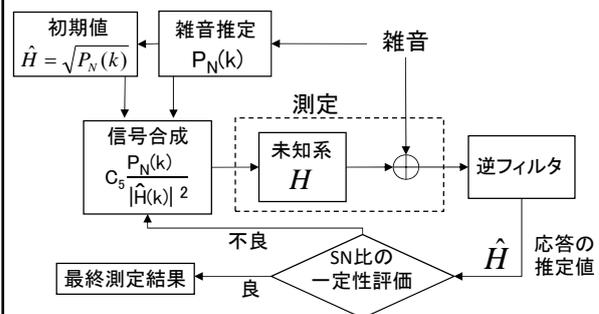
$$\text{SN比} = C_5 \quad \text{周波数 } k \text{ によらない一定値}$$

ただし、 $H(k)$ は未知なので、繰り返し測定による推定値を利用

155

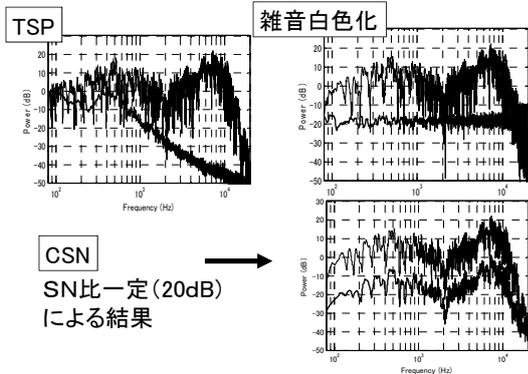
SN比を一定とするための測定手順

未知系の特性推定値 $\hat{H}(k)$ は、測定値をフィードバック



156

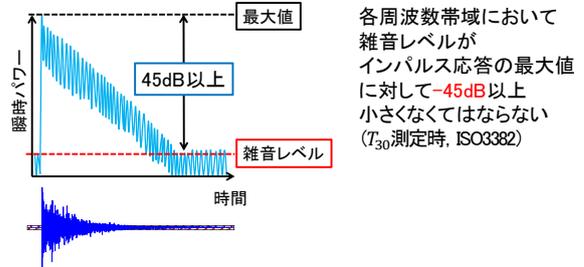
スピーカ+室内 応答の測定例



残響時間測定に対するCSN信号のメリット [3.24]

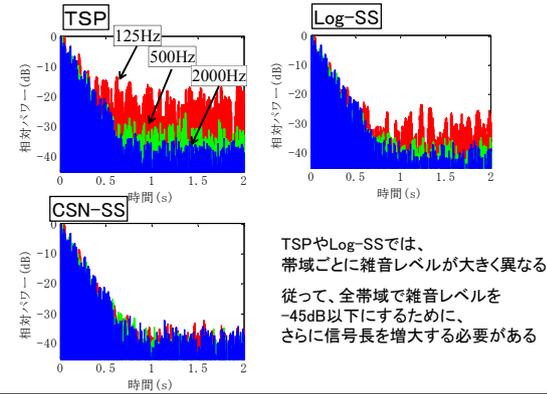
インパルス応答に基づく残響時間測定

インパルス応答の帯域別瞬時パワー



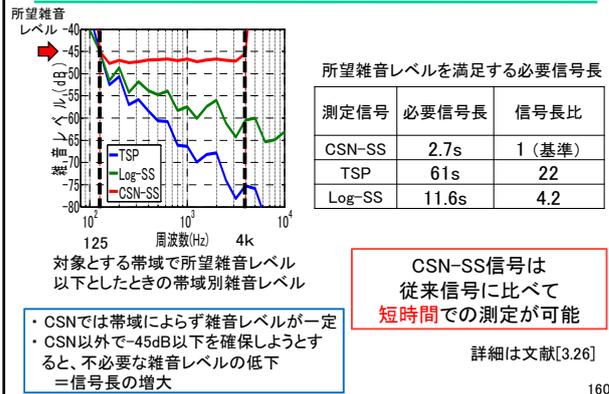
各周波数帯域において
雑音レベルが
インパルス応答の最大値
に対して-45dB以上
小さくなくてはならない
(T_{30} 測定時, ISO3382)

測定信号とオクターブバンド雑音レベル



TSPやLog-SSでは、
帯域ごとに雑音レベルが大きく異なる
従って、全帯域で雑音レベルを
-45dB以下にするために、
さらに信号長を増大する必要がある

CSN信号による測定信号の短縮



CSN-SS信号は
従来信号に比べて
短時間での測定が可能

詳細は文献[3.26]

目次

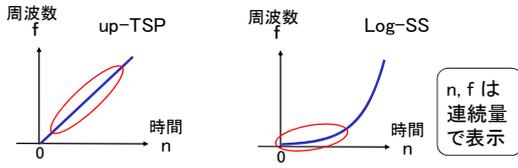
1. インパルス信号とインパルス応答
 - 1.1 インパルス信号
 - 1.2 インパルス応答と線形系
 - 1.3 離散時間系のインパルス応答
2. インパルス応答の測定原理
 - 2.1 離散フーリエ変換 (DFT)
 - 2.2 測定信号を用いた測定
3. 代表的測定信号
 - 3.1 測定信号と測定誤差
 - 3.2 測定信号の分類
 - 3.3 TSP
 - 3.3.1 TSPの定義
 - 3.3.2 TSPの時間-周波数特性
 - 3.3.3 TSPの高調波歪
 - 3.4 Log-SS
 - 3.4.1 Log-SSの定義
 - 3.4.2 Log-SSの高調波歪
 - 3.5 M系列信号
 - 3.6 適応形スペクトルを持った信号
 - 3.6.1 雑音白色化信号
 - 3.6.2 雑音最小化信号
 - 3.6.3 SN比を一定とする信号
 - 3.7 所望スペクトル信号の合成
 4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
 - 4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
 - 4.2 帯域制限
 - 4.3 インパルス応答の切り出し
 - 4.4 同期加算
 - 4.5 非定常雑音
 5. 非線形性誤差
 - 5.1 (時不変)非線形による誤差
 - 5.2 時変性による誤差
 6. その他の誤差要因
 7. 測定上の考慮点
 8. 測定時の注意点
 - 8.1 AD・DAなどの注意点
 - 8.2 録音時の雑音
 - 8.3 測定結果の評価
 9. 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
 10. むすび

3.7 所望のパワースペクトルを持った信号の合成方法

	測定信号の パワースペクトル $ S(k) ^2$
雑音白色化 NW: Noise Whitening	$C_3 \cdot P_N(k)$
雑音最小化 MN: Minimum Noise	$C_4 \cdot \sqrt{P_N(k)}$
SN比一定 CSN: Constant SN	$C_5 \cdot H(k) ^2 / P_N(k)$

これらのパワースペクトルを持つ
SS信号、PN信号の合成方法

一定振幅 SS信号のエネルギー分布



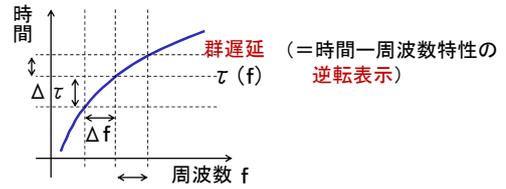
どの周波数も一定時間出力される
↓
どの周波数もエネルギー均一

低い周波数が長時間出力される
↓
低周波数成分のエネルギーが大きい

各周波数の持つエネルギーは
各周波数の出力持続時間に比例

163

パワースペクトルと群遅延



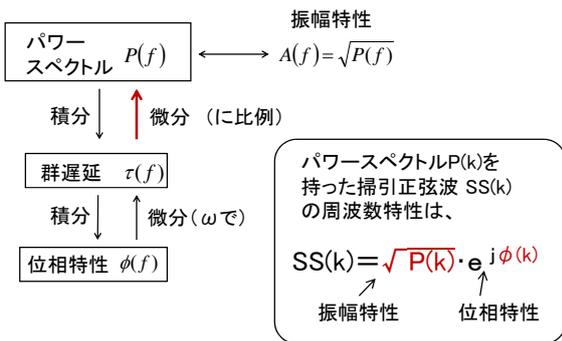
単位周波数あたりの出力持続時間
 $\Delta \tau / \Delta f$ は
群遅延特性 $\tau(f)$ の傾き

各周波数あたりのエネルギー
(=パワースペクトル $P(f)$) は、
傾きを表す、微分に比例

$$P(f) \propto \frac{d}{df} \tau(f)$$

一定振幅掃引正弦波の場合

一定振幅の掃引正弦波における パワースペクトル、群遅延、位相特性の関係



165

DFT 周波数における合成 [3.22]

◇ 群遅延 τ はパワースペクトル P の積分に比例するので、
(積分は離散量としては Σ に対応)

$$\tau(k) = C_1 \cdot \left\{ \sum_{i=0}^k P(i) + C_2 \right\}$$

ただし、 C_1 は比例定数、 C_2 は積分定数である。

$\tau(0)=0$ の条件より、 $C_2 = -P(0)$

$\tau(N/2) = J$ (実効長) の条件より、 $C_1 = J / \left\{ \left(\sum_{i=0}^{N/2} P(i) \right) - P(0) \right\}$

◇ 位相特性 ϕ は群遅延 τ の $\Omega (=2\pi k/N)$ に関する積分なので

$$\phi(k) = C_3 \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot \sum_{i=0}^k \tau(i) \quad C_3 = \text{round} \left(\frac{2/N \cdot \sum_{i=0}^{N/2} \tau(i)}{2/N \cdot \sum_{i=0}^{N/2} \tau(i)} \right)$$

ただし、 C_3 は、 $\phi(N/2)$ を π の整数倍とするための、1に近い数

166

所望のパワースペクトルを持ったPN信号

$$PN(k) = \sqrt{P(k)} \cdot e^{j\phi(k)}$$

振幅特性 位相特性

PN信号 (疑似雑音) は、
 $\phi(k)$ を、 $[0, 2\pi]$ の一様乱数で与えれば良い

☆ PN信号の問題点

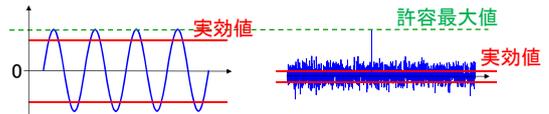
波高率 (Crest Factor) が大きい

167

波高率 (Crest Factor)

$$\text{波高率} = \frac{\text{振幅最大値}}{\text{実効値} (= \sqrt{\text{パワー}})}$$

機器やDA変換器の入出力の許容レベルにより、
最大値が制限される場合がある。



波高率小 実効値が大きい 波高率大 実効値が小さい

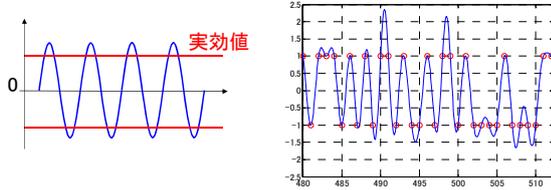
振幅最大値が制限される場合、波高率が小さいほうが、
パワーが大きい ⇒ より高いSN比の測定ができる

168

代表的な波高率

正弦波: $\sqrt{2} \approx 1.4$

M系列: 約 2.5

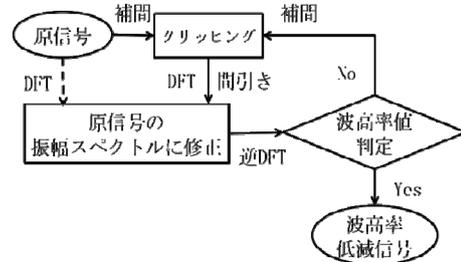


注: M系列の波高率は 1 と記された文献もあるが、DA出力されたM系列の波高率は約 2.5
波高率はデジタル値ではなく、アナログで評価すべき

169

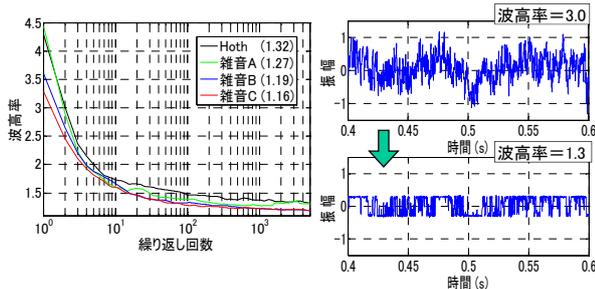
波高率の低減処理 [3.2.1]

疑似雑音の波高率は高い(3とか 4とか) 場合が多いが、これを低減することができる



170

波高率低減処理の例



100回程度の繰り返し演算で、正弦波よりも小さい波高率を実現できる

171

「3章 代表的測定信号」のまとめ (1)

- 測定信号は、
 - 位相特性(波形)の違いで、掃引正弦波(SS)と疑似雑音(PN)に分類でき、信号のパワースペクトルの違いで、白色、 $1/f$ (以上固定形)、適応形などに分類できる
- 信号の位相特性は、非線形誤差の現れ方に影響し、パワースペクトルは定常雑音の抑圧量に影響する
- 主な信号として、TSP、Log-SS、M系列、および各種適応形信号
 - ※ B&K 社の計測ソフトも、この3つを利用

172

「3章 代表的測定信号」のまとめ (2)

- Log-SS は、低周波のSN比改善効果や高調波ひずみの分離効果などの特長を持つ
- よって、スペクトル固定形では、Log-SS が第1選択肢と考える
- 適応形は事前測定が必要だが、雑音によっては有効性が高い

173

◎ 主な誤差要因

- ◇ 雑音性誤差
 - 定常雑音
 - 暗騒音、電氣的雑音、など
 - 非定常雑音
 - ドアの開閉音、足音、音声、など
- ◇ 非線形誤差
 - 非線形性(時不変)
 - スピーカや音響機器への過大入力による
 - 時変性
 - 室温変化、風の影響、など
- ◇ その他
 - DFT処理の円状性に依存した誤差、など

174

◎ 誤差とその抑圧方法

- 4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
- 5. 非線形性誤差
- 6. その他の誤差要因

- ・ 誤差の説明
- ・ その抑圧方法
- ・ 測定信号による誤差の大小
→ 測定信号の選択指針

175

4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法

◇ 定常雑音

- ・ 定常雑音は、測定結果において定常誤差となる
(以下、本項では、「定常」を略して、単に「雑音」、「誤差」と呼ぶ)

(誤差抑圧方法)

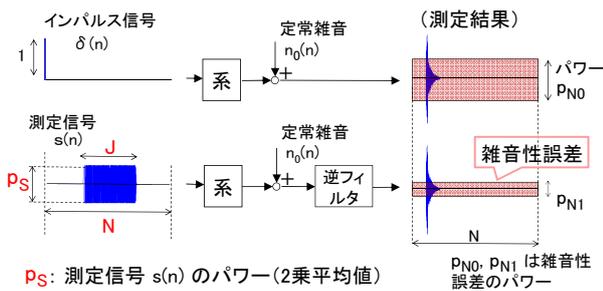
- 4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
- 4.2 帯域制限
- 4.3 インパルス応答の切り出し
- 4.4 同期加算

◇ 非定常雑音

- 4.5 非定常雑音と誤差

176

定常雑音抑圧効果 NRP の定義



雑音抑圧効果 NRP (Noise Reduction Performance):
インパルス入力時と、測定信号 $s(n)$ 入力時の
雑音性誤差のパワー比 p_{N0}/p_{N1}

177

雑音抑圧効果 NRP の理論式

$$NRP = \frac{p_{N0}}{p_{N1}} = J \cdot p_S \cdot \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \hat{P}_{N0}(k) / |\hat{S}(k)|^2}$$

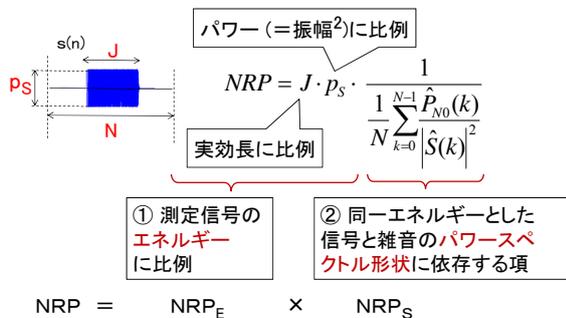
エネルギーで正規化した
環境雑音
測定信号
のパワースペクトル

$$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \hat{P}_{N0}(k) = 1$$

証明は付録5.1-1
及び文献[4.3.1]

178

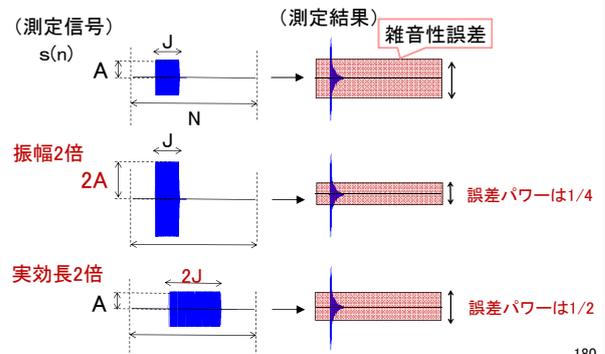
雑音抑圧効果 NRP の説明



179

① エネルギーによる雑音抑圧効果 NRP_E の例

抑圧効果は信号エネルギー (= 振幅2乗 × 実効長) に比例



180

② 測定信号のスペクトル形状による雑音抑圧効果 NRP_S

$$NRP = J \cdot p_S \cdot \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\hat{P}_{N0}(k)}{|\hat{S}(k)|^2}}$$

NRP_S

信号名	スペクトル $ S(k) ^2$	NRP_S
白色 (TSP)	1	1
雑音白色化	$P_N(k)$	1
雑音最小化	$\sqrt{P_N(k)}$	>1
$1/f$ (log-SS)	$1/k$	>1 or <1

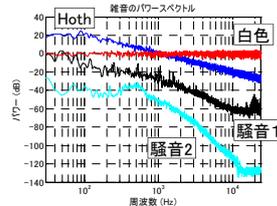
文献 [4.3.1]

181

NRP_S の実測値例

信号名	スペクトル	Hoth	騒音1	騒音2	白色
白色 (TSP)	1	0 [dB]	0	0	0
雑音白色化	$P_N(k)$	-0.1	0.8	0.4	0
$1/f$ (log-SS)	$1/k$	8.8	17.8	9.2	-7.3
雑音最小化	$\sqrt{P_N(k)}$	10.9	19.7	15.0	0

*) 信号エネルギーは同一

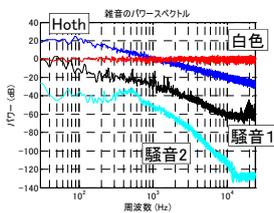


- ・ 抑圧効果最大は $\sqrt{P_N(k)}$
- ・ 固定形スペクトルを利用する場合も $\sqrt{P_N(k)}$ に類似が良い
- ・ スペクトルの形が似ていない信号を使うと、誤差が増加(不適切な信号)(白色雑音とLog-SSなど)

182

NRP_S の実測値例

信号名	スペクトル	Hoth	騒音A	騒音C	白色
白色 (TSP)	1	0 [dB]	0	0	0
雑音白色化	$P_N(k)$	-0.1	0.8	0.4	0
$1/f$ (log-SS)	$1/k$	8.8	17.8	9.2	-7.3
雑音最小化	$\sqrt{P_N(k)}$	10.9	19.7	15.0	0



*) 信号エネルギーは同一

雑音抑圧量と信号時間
6dBの抑圧量
= 4倍の信号実効長
(白色雑音とLog-SSなど)

183

測定信号のエネルギーとスペクトルによる誤差抑圧効果(まとめ)

雑音性誤差の抑圧効果は

- ① 信号エネルギー
 $J \cdot p_S$ に比例
- ② 信号のスペクトル形状に依存
 - ・ $\sqrt{P_N(k)}$ (雑音最小化信号) が最適
 - ・ 固定形スペクトルでは $\sqrt{P_N(k)}$ に近いものが良い
例えば、
低域の強い室内騒音には Log-SS が適
白色雑音には TSP が適
 - ・ 雑音の種類によっては、測定信号の選択によって、大幅な測定時間短縮ができる

184

4.2 帯域制限

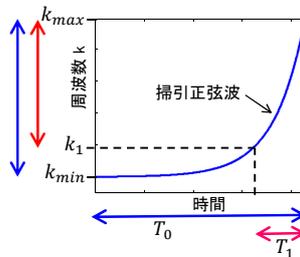
- (1) 掃引時間の短縮による雑音抑圧効果 (NRP_{B1})
- (2) 雑音成分の除去による雑音抑圧効果 (NRP_{B2})

帯域制限による雑音抑圧効果

$$NRP_B = NRP_{B1} \times NRP_{B2}$$

185

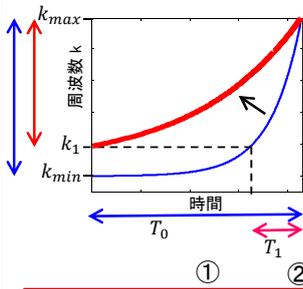
帯域制限による掃引時間の短縮



当初、 $k_{min} \sim k_{max}$ であった測定信号を、 $k_1 \sim k_{max}$ に帯域制限すると、掃引時間は、 T_0 から T_1 に短縮する。

186

掃引時間の短縮による雑音抑圧効果

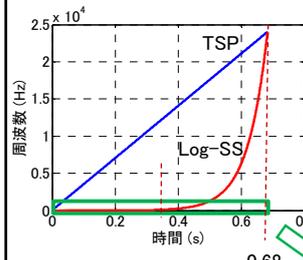


- ① 帯域制限した信号を、当初の信号長 T_0 を使って再合成すると、帯域あたりの信号エネルギーが T_0/T_1 倍増加する
→ 雑音抑圧効果
- ② 掃引時間は、その掃引帯域に含まれる信号のエネルギーに比例する

$$NRP_{B1}(k_1) = \frac{T_0}{T_1} = \frac{\sum_{k_{min}}^{k_{max}} |S(k)|^2}{\sum_{k_1}^{k_{max}} |S(k)|^2}$$

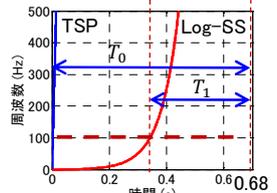
187

帯域制限による掃引時間短縮の例



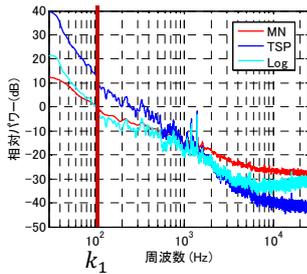
Log-SS のように低域の掃引時間が長い信号では、帯域制限を行って不要な低域を除外すれば、雑音抑圧効果が得られる。

Log-SS では、測定範囲を100Hz 以上にすると、掃引時間は約1/2(注: 測定信号長に依存)となり、約3dBの雑音抑圧効果が得られるが、TSP では、雑音抑圧効果はほとんど得られない



188

(2) 雑音成分の除去による雑音抑圧効果



帯域制限すれば、利用帯域外の雑音は除去される。

図の例では、100Hz 以下の雑音成分が除去される

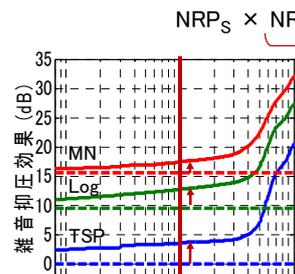
MN: 雑音最小化信号

$P_{N1}(k)$: 各測定信号で得られる雑音性誤差のパワースペクトル

$$NRP_{B2}(k_1) = \frac{\sum_{k_{min}}^{k_{max}} P_{N1}(k)}{\sum_{k_1}^{k_{max}} P_{N1}(k)}$$

189

(総合的) 雑音性誤差抑圧効果



例えば、下限周波数 k_1 を100Hz に帯域制限した場合、全帯域利用と比べ、MN信号では2dB、Log信号では3dB、TSPでは4dBの雑音抑圧効果が得られる。

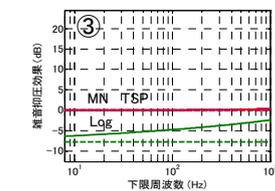
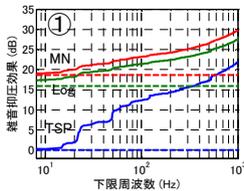
(全帯域利用)測定信号のパワースペクトルによる効果 (NRP_S)

TSP信号で全帯域利用時の雑音性誤差レベルを0dB

NRPは、雑音と信号のスペクトルから計算でき、測定信号選択の指標となる

190

各種の雑音と雑音抑圧効果



- ① 「平均的な室内騒音」
 - MN と Log との差は小さい
 - TSP は帯域制限効果が大い
- ② 「低域成分の大きな室内騒音」
 - MN や Log も帯域制限効果が大い
- ③ 「白色雑音」
 - MN と TSP は一致
 - Log は、下限100Hz で5dB の差 (= 信号長換算で3倍の差)

191

目次

- インパルス信号とインパルス応答
 - 1.1 インパルス信号
 - 1.2 インパルス応答と線形系
 - 1.3 離散時間系のインパルス応答
- インパルス応答の測定原理
 - 2.1 離散フーリエ変換(DFT)
 - 2.2 測定信号を用いた測定
- 代表的測定信号
 - 3.1 測定信号と測定誤差
 - 3.2 測定信号の分類
 - 3.3 TSP
 - 3.3.1 TSPの定義
 - 3.3.2 TSPの時間-周波数特性
 - 3.3.3 TSPの高調波歪
 - 3.4 Log-SS
 - 3.4.1 Log-SSの定義
 - 3.4.2 Log-SSの高調波歪
 - 3.5 M系列信号
 - 3.6 適応形スペクトルを持った信号
 - 3.6.1 雑音白色化信号
 - 3.6.2 雑音最小化信号
 - 3.6.3 SN比を一定とする信号
- 雑音性誤差と誤差抑圧方法
 - 4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
 - 4.2 帯域制限
 - 4.3 インパルス応答の切り出し
 - 4.4 同期加算
 - 4.5 非定常雑音
- 非線形性誤差
 - 5.1 (時不変)非線形性による誤差
 - 5.2 時変性による誤差
- その他の誤差要因
- 測定上の考慮点
- 測定時の注意点
 - 8.1 AD・DA などの注意点
 - 8.2 録音時の雑音
 - 8.3 測定結果の評価
- 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
- むすび

192

4.3.1 切出しによる誤差抑圧効果：測定結果におけるSN比

測定信号 $s(n)$ の振幅 A 、雑音の振幅 A 、信号長 J 、雑音長 N 。雑音は全長にわたって分布している。

信号長 $(J \text{ と } N)$ が 2倍、信号長 $2J$ 、雑音長 $2N$ 。雑音は全長にわたって分布している。

信号長を長くしても録音信号のSN比は改善されないのでは？
Yes

信号長を2倍にして、信号のエネルギーを2倍にしても、録音される雑音のエネルギーも2倍になる

193

測定結果における誤差パワー

測定信号 $s(n)$ の振幅 A 、雑音の振幅 A 、信号長 J 、雑音長 N 。雑音は全長にわたって分布している。

信号長 $(J \text{ と } N)$ が 2倍、信号長 $2J$ 、雑音長 $2N$ 。雑音は全長にわたって分布している。

雑音性誤差の総エネルギーの総量(面積)は同じ → SN比(エネルギー比)は同じ

誤差パワー大 (雑音性誤差)

誤差パワー小 (雑音性誤差)

注) N だけ増すとSN比が低下

インパルス応答は特定の時間に集中 → 信号長によらず同じ大きさ
⇒ 雑音性誤差は全区間に分布 → 信号長大で誤差パワー小

194

周波数特性算出のときの注意

周波数特性をDFT(FFT)で計算する場合、全データを使ってしまうと誤差は減少しない

雑音性誤差の総エネルギーの総量(面積)は同じ → SN比は同じ

誤差パワー大 (雑音性誤差)

誤差パワー小 (雑音性誤差)

195

信号長とDFT結果

インパルス応答は局所的に存在、雑音性誤差は広く分布 → パワーの減少、雑音の影響小

信号長増加 → 周波数特性も雑音も広く分布 → 雑音の影響は不変

インパルス応答「全体」のSN比改善が必要

196

インパルス応答のSN比の改善

インパルス応答の時間軸上での切り出し

- インパルス応答の切り出しを行うことでSN比が改善される
- 切り出し区間 L_h 内では、SN比は、誤差パワー p_N に比例して減少する
- (再) 切り出しを行わない状態だとSN比は改善していない！
- 周波数応答計算前に切り出すことを忘れない！

197

周波数特性 $H(k)$ の測定(重要)

測定信号 $s(n)$ 、測定出力 $y(n)$ 、インパルス応答 $h(n)$ 、周波数特性 $H(k)$ 。

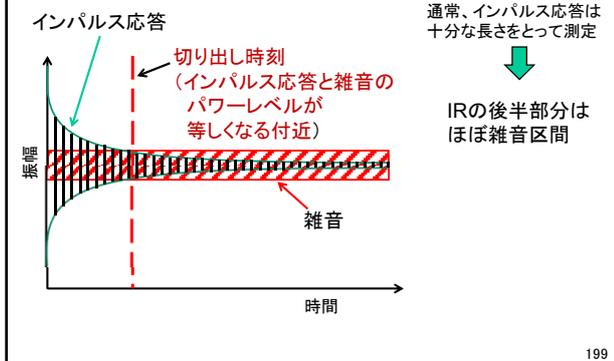
切り出しによるSN比改善

周波数特性としてこれを使ってはいけない。SN比が改善されていない

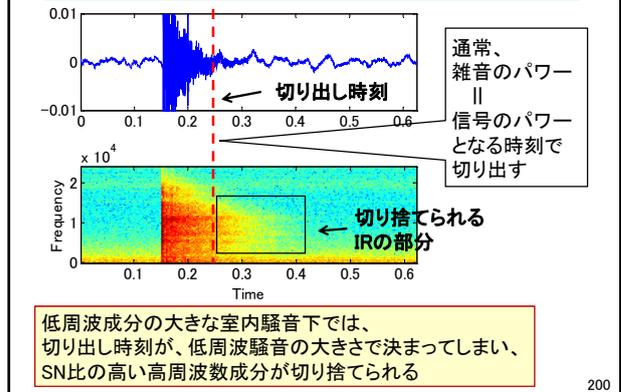
SN比を改善した周波数特性

198

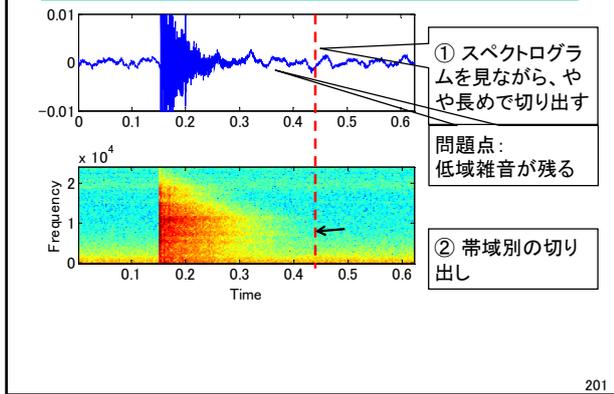
4.3.2 切出しの課題：切り出し方法



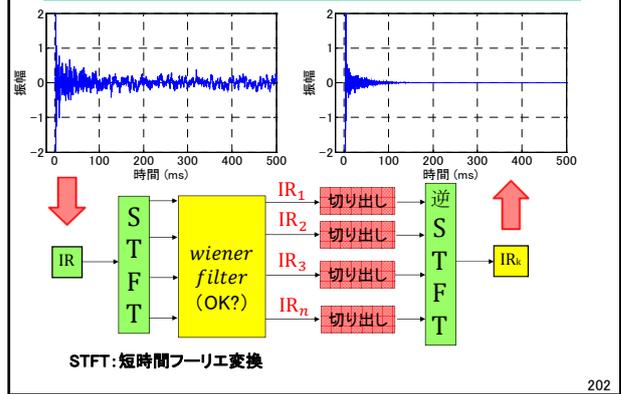
時間波形切り出しの問題点



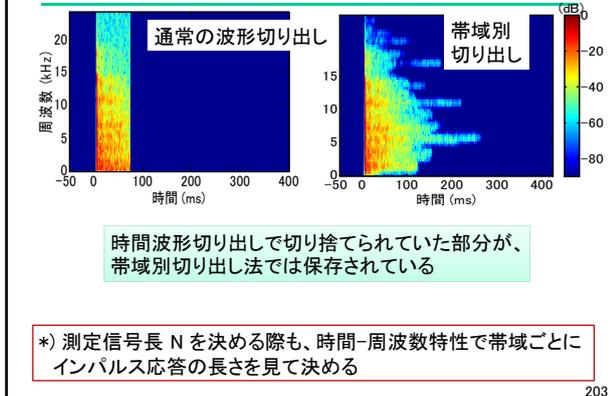
解決方法



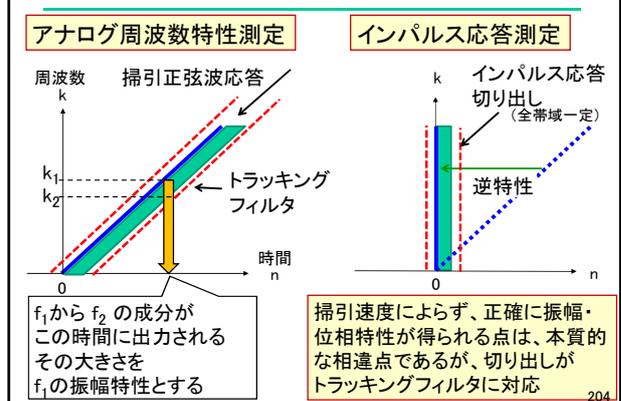
検討中の手法 (帯域別切り出し) [5.1][5.2]



帯域別 (サブバンド) 切り出しの効果



(参考) 古典的なSSIによる周波数特性測定との比較



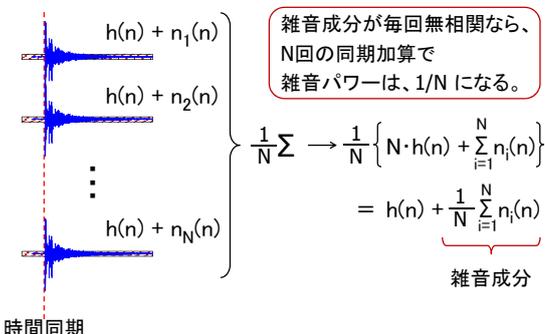
目次

1. インパルス信号とインパルス応答
 - 1.1 インパルス信号
 - 1.2 インパルス応答と線形系
 - 1.3 離散時間系のインパルス応答
2. インパルス応答の測定原理
 - 2.1 離散フーリエ変換 (DFT)
 - 2.2 測定信号を用いた測定
3. 代表的測定信号
 - 3.1 測定信号と測定誤差
 - 3.2 測定信号の分類
 - 3.3 TSP
 - 3.3.1 TSPの定義
 - 3.3.2 TSPの時間-周波数特性
 - 3.3.3 TSPの高調波歪
 - 3.4 Log-SS
 - 3.4.1 Log-SSの定義
 - 3.4.2 Log-SSの高調波歪
 - 3.5 M系列信号
- 3.6 適応形スペクトルを持った信号
 - 3.6.1 雑音白色化信号
 - 3.6.2 雑音最小化信号
 - 3.6.3 SN比を一定とする信号
- 3.7 所望スペクトル信号の合成
4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
 - 4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
 - 4.2 帯域制限
 - 4.3 インパルス応答の切り出し
 - 4.4 同期加算
 - 4.5 非定常雑音
 5. 非線形性誤差
 - 5.1 (時不変)非線形性による誤差
 - 5.2 時変性による誤差
 6. その他の誤差要因
 7. 測定上の考慮点
 8. 測定時の注意点
 - 8.1 AD・DAなどの注意点
 - 8.2 録音時の雑音
 - 8.3 測定結果の評価
 9. 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
 10. むすび

205

4.4 同期加算

複数回の測定結果を、時間同期して平均



206

証明

雑音成分は毎回無相関 $E[n_i(n) \cdot n_j(n)] = 0 \quad (i \neq j)$
 各回の雑音パワーは同じ値 $P_{N0} \quad E[n_i^2(n)] = P_{N0} \quad (\text{for all } i)$
 ただし、 $E[\cdot]$ は期待値

と仮定すると、雑音成分のパワー P_N は、

$$P_N = E \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i(n) \right)^2 \right] = \frac{1}{N^2} E \left[\sum_{i=1}^N n_i^2(n) + 2 \sum_{i \neq j} n_i(n) n_j(n) \right]$$

$$= \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N E[n_i^2(n)] + 2 \sum_{i \neq j} E[n_i(n) n_j(n)] = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N P_{N0} = \frac{1}{N} P_{N0}$$

1回測定の雑音パワー P_{N0} の $1/N$ に減少

207

同期加算のSN比改善効果

N回の平均で、SN比を $10 \log_{10}(N)$ [dB] 改善

例)

$N=10 \rightarrow 10 \log_{10}(10) = 10$ dB 改善

$N=100 \rightarrow 10 \log_{10}(100) = 20$ dB 改善

$N=1000 \rightarrow 10 \log_{10}(1000) = 30$ dB 改善

208

同期加算の注意事項

- ・ 時変性のある系に対して、多数回(長時間)の平均は誤差要因となる (高周波成分の低下) (雑音抑圧効果とのトレードオフ)
- ・ スピーカはウォームアップをしたほうがベター (時変性回避)
- ・ 短い測定信号を使って多数回の同期加算することと、長い測定信号で1回測定することとの、優劣 時変系 \rightarrow 長いSS、非定常雑音 \rightarrow 短い信号の同期加算
- ・ 時不変な非線形誤差の抑圧には効果がない

209

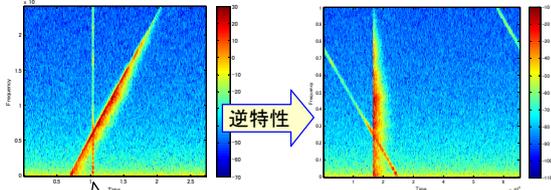
目次

1. インパルス信号とインパルス応答
 - 1.1 インパルス信号
 - 1.2 インパルス応答と線形系
 - 1.3 離散時間系のインパルス応答
2. インパルス応答の測定原理
 - 2.1 離散フーリエ変換 (DFT)
 - 2.2 測定信号を用いた測定
3. 代表的測定信号
 - 3.1 測定信号と測定誤差
 - 3.2 測定信号の分類
 - 3.3 TSP
 - 3.3.1 TSPの定義
 - 3.3.2 TSPの時間-周波数特性
 - 3.3.3 TSPの高調波歪
 - 3.4 Log-SS
 - 3.4.1 Log-SSの定義
 - 3.4.2 Log-SSの高調波歪
 - 3.5 M系列信号
- 3.6 適応形スペクトルを持った信号
 - 3.6.1 雑音白色化信号
 - 3.6.2 雑音最小化信号
 - 3.6.3 SN比を一定とする信号
- 3.7 所望スペクトル信号の合成
4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
 - 4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
 - 4.2 帯域制限
 - 4.3 インパルス応答の切り出し
 - 4.4 同期加算
 - 4.5 非定常雑音
 5. 非線形性誤差
 - 5.1 (時不変)非線形性による誤差
 - 5.2 時変性による誤差
 6. その他の誤差要因
 7. 測定上の考慮点
 8. 測定時の注意点
 - 8.1 AD・DAなどの注意点
 - 8.2 録音時の雑音
 - 8.3 測定結果の評価
 9. 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
 10. むすび

210

4.5 非定常(突発性)雑音の影響 (1)

SS信号による測定



測定中に
突発音

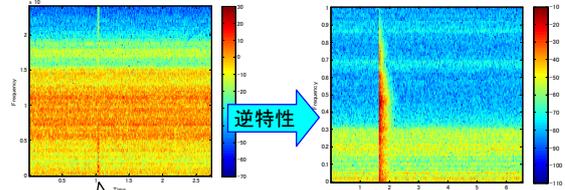
突発性雑音は、
測定結果に致命傷

ドアの開閉音、咳、音声、落下音、足音など

211

非定常(突発性)雑音の影響 (2)

PN(疑似雑音)による測定



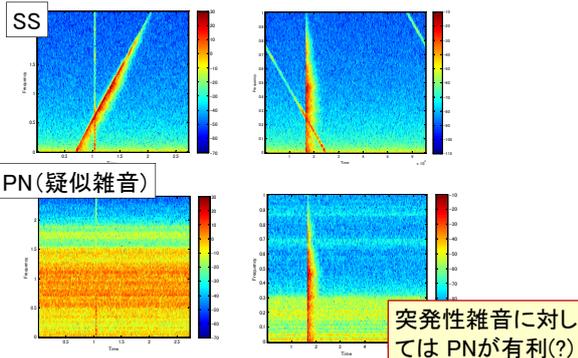
測定中に
突発音

PNの逆特性は位相を
ランダム化するので
時間集中した雑音は
全区間に分散される

ドアの開閉音、咳、音声、落下音、

212

非定常(突発性)雑音の影響 (まとめ)

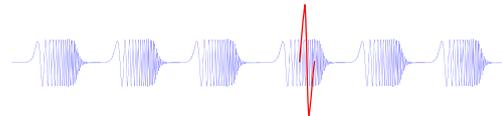


213

非定常雑音対策としての同期加算

非定常雑音の発生頻度が少ない場合

複数回測定して、
非定常雑音が発生していない区間を同期加算



214

4章のまとめ

- 1) 測定結果に含まれる定常雑音の影響は、
 - a) 信号エネルギー(振幅と長さ)の増加
 - b) 適切なパワースペクトルを持った信号の選択
 - c) 目的に不必要な帯域の制限
 - d) インパルス応答の切出し
 - e) 同期加算
 などによって低減できる
- 2) 測定環境における雑音 $P_N(k)$ に対して、上記 a)~c) によって得られる雑音抑圧効果 NRP を表すグラフを示した。(MATLAB関数) これは、測定信号の選択指針を与える。
- 3) 周波数特性を計算する場合は、必ずインパルス応答を切出してから行うこと
- 4) 非定常雑音は、掃引正弦波測定に大きな影響
→ 対策は、PN信号の利用、同期加算による選択

215

5. 非線形誤差

要因1: (時不変)非線形系

スピーカなどの線形可動範囲を超えたために
発生する振幅の非直線性など

要因2: 時変系

室内音響伝達系の温度変化、風などによる
時間軸変動

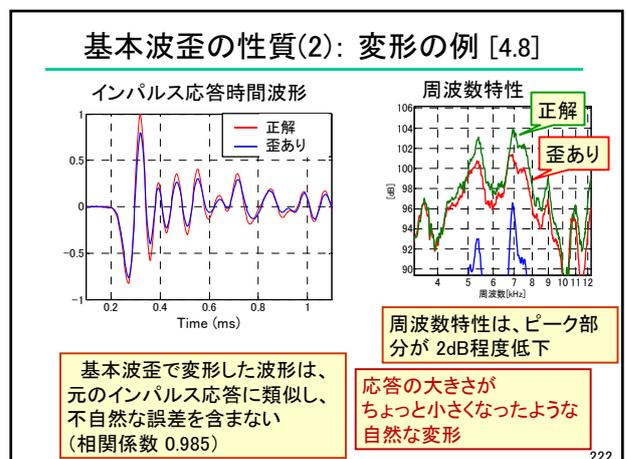
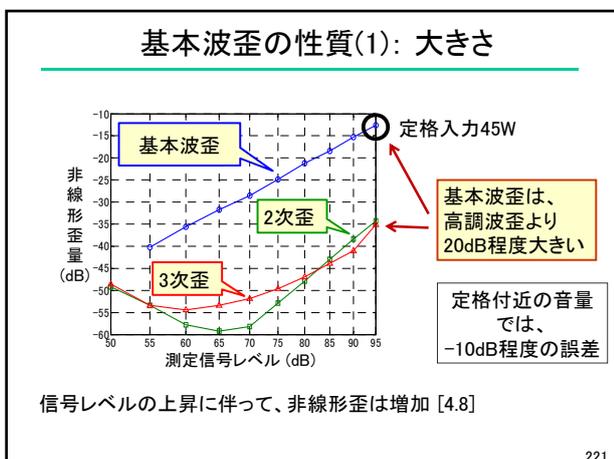
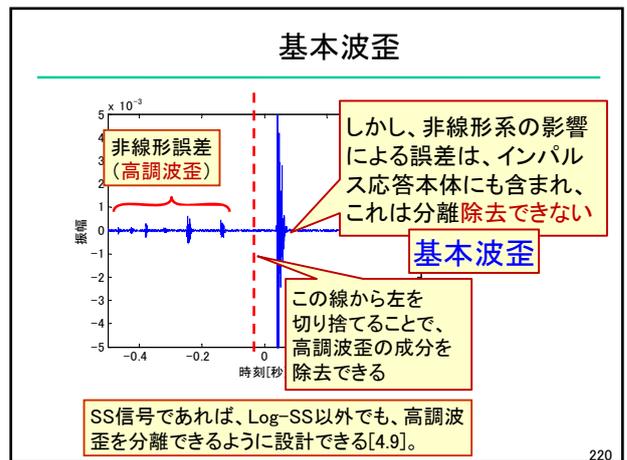
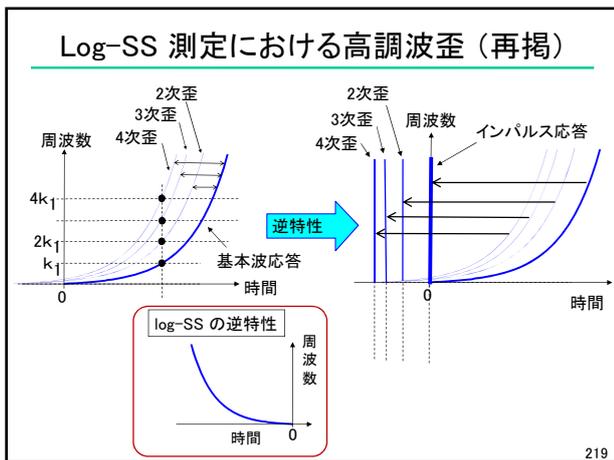
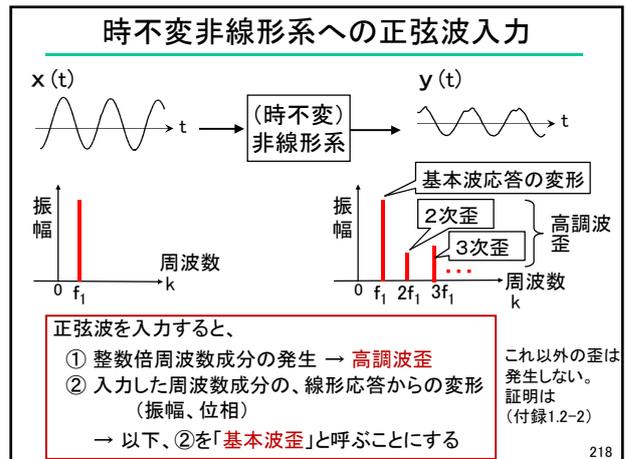
* 誤差の現れ方は測定信号の型に大きく依存

216

目次

1. インパルス信号とインパルス応答	3.6.2 雑音最小化信号
1.1 インパルス信号	3.6.3 SN比を一定とする信号
1.2 インパルス応答と線形系	3.7 所望スペクトル信号の合成
1.3 離散時間系のインパルス応答	4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
2. インパルス応答の測定原理	4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
2.1 離散フーリエ変換 (DFT)	4.2 帯域制限
2.2 測定信号を用いた測定	4.3 インパルス応答の切り出し
3. 代表的測定信号	4.4 同期加算
3.1 測定信号と測定誤差	4.5 非定常雑音
3.2 測定信号の分類	5. 非線形性誤差
3.3 TSP	○ 5.1 (時不変)非線形による誤差
3.3.1 TSPの定義	5.2 時変性による誤差
3.3.2 TSPの時間-周波数特性	6. その他の誤差要因
3.3.3 TSPの高調波歪	7. 測定上の考慮点
3.4 Log-SS	8. 測定時の注意点
3.4.1 Log-SSの定義	8.1 AD・DAなどの注意点
3.4.2 Log-SSの高調波歪	8.2 録音時の雑音
3.5 M系列信号	8.3 測定結果の評価
3.6 適応形スペクトルを持った信号	9. 測定信号が利用できない場合の測定
3.6.1 雑音白色化信号	(最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
	10. むすび

217



基本波歪の性質(まとめ)

- オーディオ分野では、高調波歪は、異音の発生なので重要視されてきたが、基本波歪は、聴覚的には影響が少ないので注目されてこなかった。
- 適切なSS信号を用いれば高調波歪は除去できるが基本波歪は除去できない
- 基本波歪は高調波歪に比べて20dB程度大きい
- ただし、基本波歪は、インパルス応答に不自然な誤差は、発生しない。
- 歪の大きさや形は、測定信号の種類・長さに依存しない
→ 音量を下げるのが唯一の低減方法 [4.8.1]

223

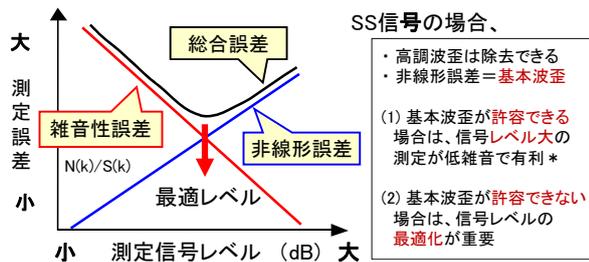
基本波歪が許容できる用途、できない用途

- ◇ 許容できる用途
 - インパルス応答の相対レベルやエネルギー減衰などを用いる場合
 - 残響時間計測 [4.11.2]
 - 多くの室内音響パラメータ [4.11.3]
 - 相対レベルで良いシミュレーション
- ◇ 許容できない用途
 - インパルス応答の絶対レベルや正確な波形が重要な場合
 - 両耳聴覚シミュレーション用
 - 音場制御・騒音制御用
 - 逆フィルタの算出

224

測定誤差のトレードオフ関係

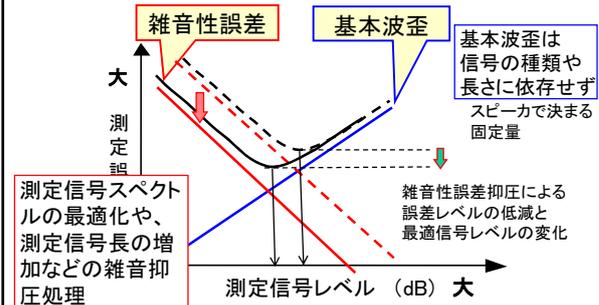
測定信号レベルと雑音性誤差・非線形誤差の関係



*) アンプ、スピーカの定格以上にはしないほうが良い

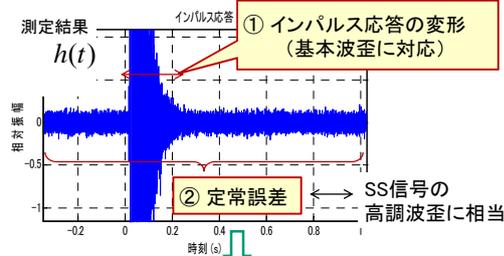
225

基本波歪が許容できない場合の誤差の低減方法



226

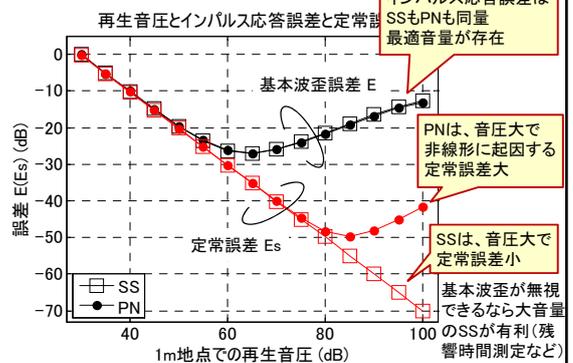
PN信号における非線形誤差の現れ方 2種



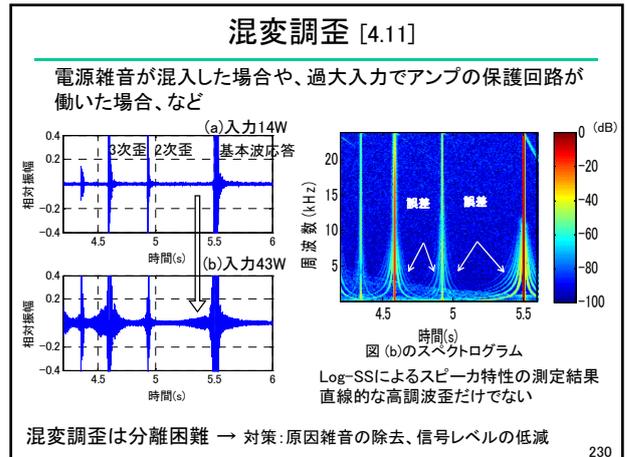
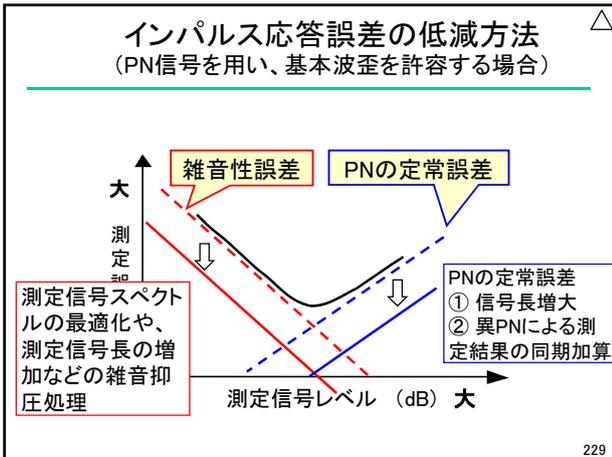
- 総量が基本波歪より20dB程度小さい
- しかし、残響曲線には影響する
- 信号長に反比例して誤差パワーは減少

227

2種の誤差とSSとPN



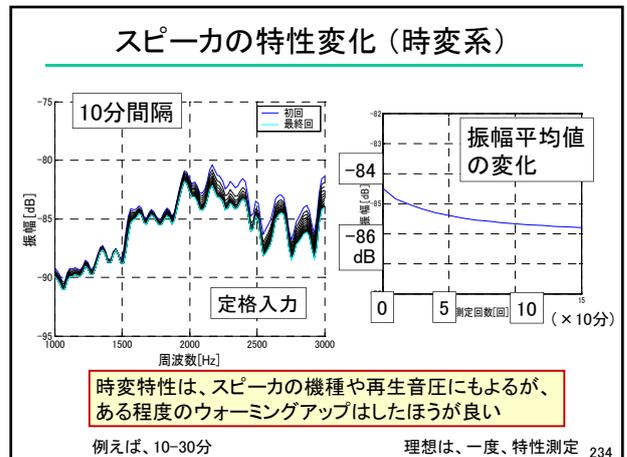
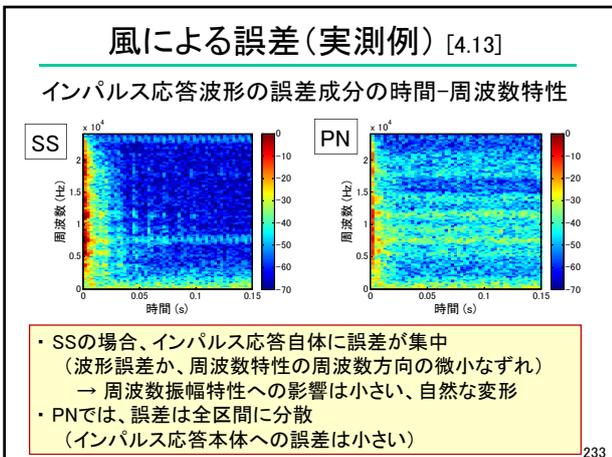
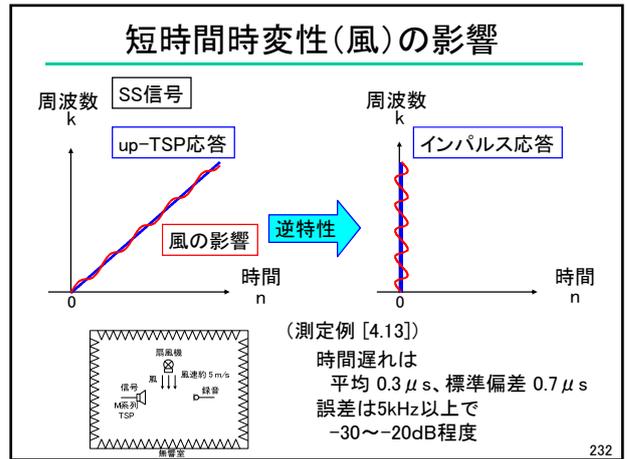
228



目次

1. インパルス信号とインパルス応答	3.6.2 雑音最小化信号
1.1 インパルス信号	3.6.3 SN比を一定とする信号
1.2 インパルス応答と線形系	3.7 所望スペクトル信号の合成
1.3 離散時間系のインパルス応答	4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
2. インパルス応答の測定原理	4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
2.1 離散フーリエ変換 (DFT)	4.2 帯域制限
2.2 測定信号を用いた測定	4.3 インパルス応答の切り出し
3. 代表的測定信号	4.4 同期加算
3.1 測定信号と測定誤差	4.5 非定常雑音
3.2 測定信号の分類	5. 非線形性誤差
3.3 TSP	5.1 (時不変)非線形による誤差
3.3.1 TSPの定義	○ 5.2 時変性による誤差
3.3.2 TSPの時間-周波数特性	6. その他の誤差要因
3.3.3 TSPの高調波歪	7. 測定上の考慮点
3.4 Log-SS	8. 測定時の注意点
3.4.1 Log-SSの定義	8.1 AD・DA などの注意点
3.4.2 Log-SSの高調波歪	8.2 録音時の雑音
3.5 M系列信号	8.3 測定結果の評価
3.6 適応形スペクトルを持った信号	9. 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
3.6.1 雑音白色化信号	10. むすび

231



「5章 非線形誤差」のまとめ

◇ (時不変) 非線形誤差

- ・ 高調波歪 { SS信号では除去できる
- ・ 基本波歪 除去できない { 高調波歪より20dB程度大きい
・ 自然な変形

許容できる応用
(室内音響特性測定など)
↓
大音量の測定が有効

許容できない応用
(音場制御用など)
↓
最適音量での測定が有効

◇ 時変性誤差

SS: 本体の自然な変形 ⇔ PN: 定常誤差

235

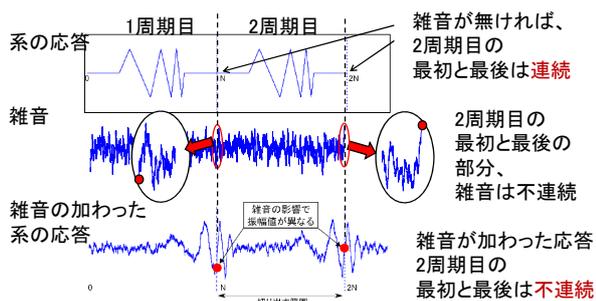
6. その他の誤差要因

DFT 処理の円状特性による誤差

(1) 円状たたみ込みのための切り出しへの影響

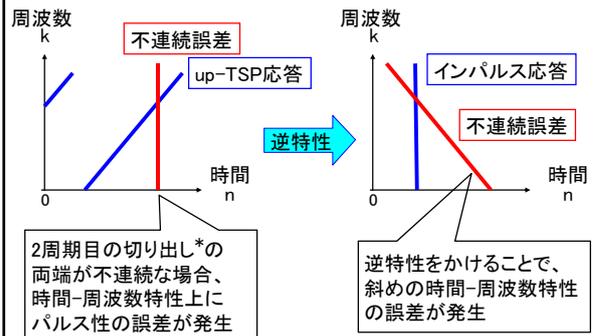
236

(1) 円状たたみ込みのための切り出しへの影響



237

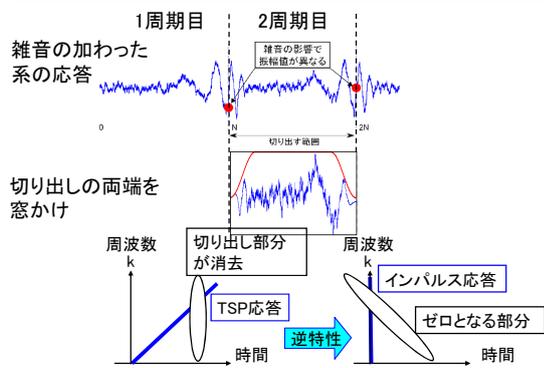
雑音の影響による切り出し部の誤差



* 特に、1周期+Lhの切り出しの際に応答と重なりやすい

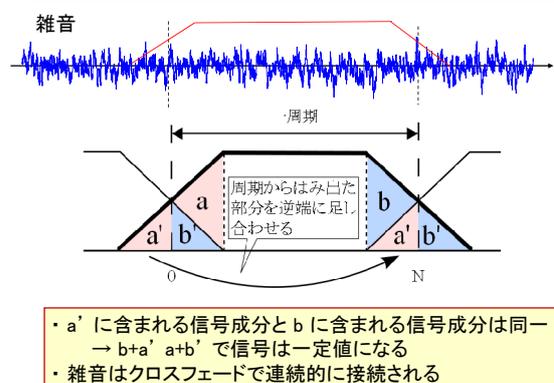
238

単純な窓かけでは不十分

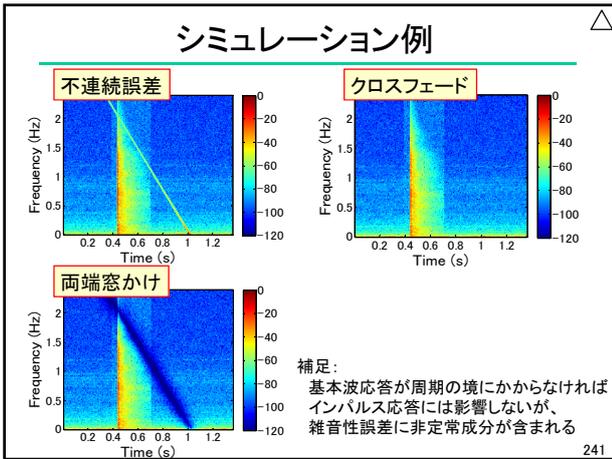


239

巡回的クロスフェード接続 [4.3]



240



7. 測定上の考慮点

- ・ 信号長 N の定め方
- ・ 2周期再生の必要性再考

242

測定信号長 N の定め方

- ・ インパルス応答の長さ L_h より長く定める必要
- ・ L_h の 1.5~2倍以上にしておくのが無難
- ・ L_h は予備測定や予測で得る
- ・ N (実際は J) は大きいほど誤差の抑圧効果が向上するので、
要求される誤差条件に基づいて決定する

243

実効長 J の定め方

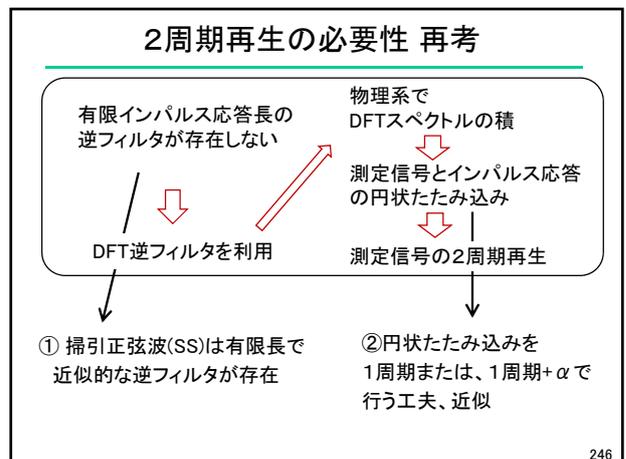
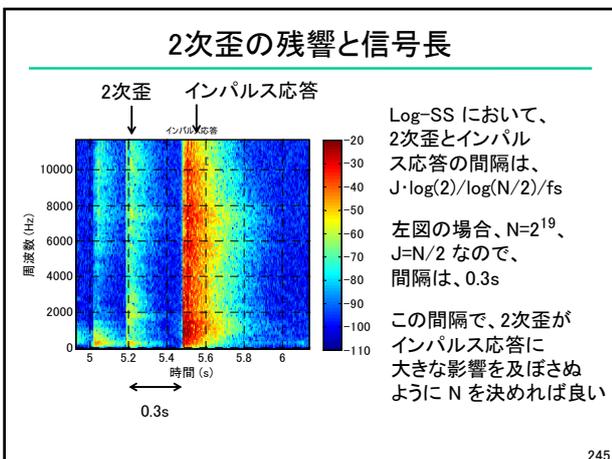
- ・ PN 信号の場合: $J=N$ が必須
- ・ SS 信号の場合

実効長 $J=N/2$

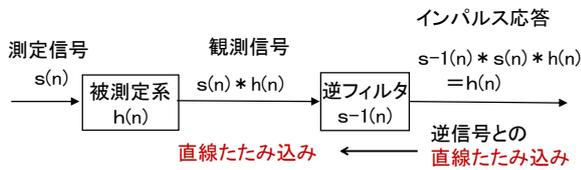
実効長 $J=N$

- 雑音抑圧量は J に比例 ($J \leq N$)
- ただし、 $J=N$ とすると、
 - ・ 最大、最小周波数の重なり
 - ・ 一周期の切り出し時の端点雑音の影響(後述)
 - ・ 非線形誤差の重なり(後述)

⇒ $J=(3/4)N \sim (1/2)N$ 程度とすることが多い(要検討) 244



有限インパルス応答長の逆フィルタ



逆フィルタのインパルス応答(逆信号)が有限長であれば、直線畳み込みでインパルス応答が得られる

247

直線畳み込みのデジタル演算

1) デジタルでも時間領域で計算すれば、直線たたみ込みが実行できる (ただし、演算時間が大きい)

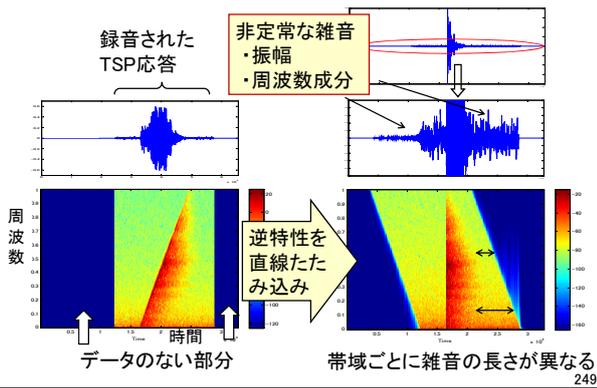
2) 各信号にゼロを付加すれば、DFT の積でも、直線たたみ込みになる (円状=直線となる)

$$[y(n), 0 \cdots 0] \rightarrow Y(k) \quad [s^{-1}(n), 0 \cdots 0] \rightarrow S^{-1}(k)$$

$DFT^{-1}[S^{-1}(k) \cdot Y(k)] \rightarrow s^{-1}(n)$ と $y(n)$ との直線たたみ込み (ただし、サイズが増加する)

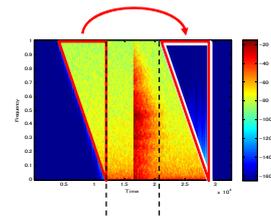
248

問題点: 直線たたみ込みによる雑音性誤差の非定常化



249

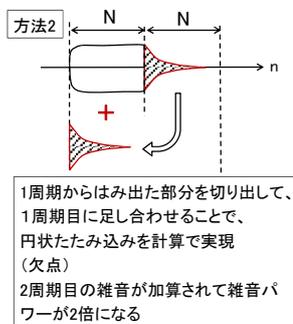
円状たたみ込みとの違い



円状たたみ込みの場合は、はみ出た部分は回り込むので、雑音性誤差の定常性が確保される

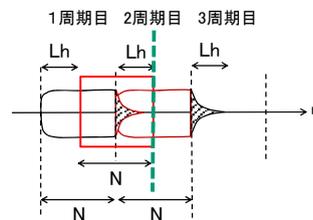
250

1周期再生で円状たたみ込みを実現する方法



251

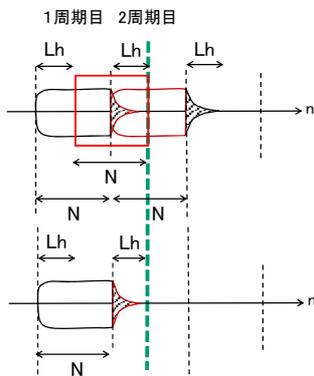
1周期 + Lh の再生



- インパルス応答長 L_h (周期からはみ出る応答の長さ) がわかっていれば、 $N + L_h < 2$ 周期の長さ再生して、 $L_h \sim L_h + N - 1$ を切り出して利用 \Rightarrow 2周期再生と同じ結果
- 特に、 $N \gg L_h$ の場合に有効

252

1周期+Lh 再生と、1周期再生



253

「7章 測定上の考慮点」のまとめ

- ・適切な信号長 N は、測定結果の誤差レベルや2次歪の影響を見ながら、試行錯誤で決定する。
- ・掃引正弦波は、有限長の逆フィルタが存在するので、1周期再生と直線たたみ込みでも測定ができる
- 市販のSS信号ソフトは、1周期再生も多い。しかし、
- ・直線たたみ込みは、雑音区間が非正常化
- ・1周期+Lh(インパルス応答長)再生・録音でも、円状たたみ込みが実現できる
- ・1周期再生でも録音は、1周期+Lh 必要

よって、2周期再生または、1周期が長い場合は、1周期+Lh 再生を薦める (要検討)

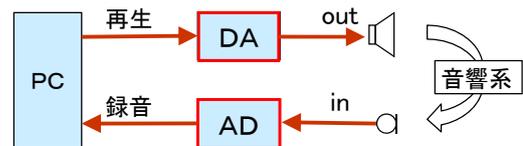
254

目次

- | | |
|--------------------|--|
| 1. インパルス信号とインパルス応答 | 3.6.2 雑音最小化信号 |
| 1.1 インパルス信号 | 3.6.3 SN比を一定とする信号 |
| 1.2 インパルス応答と線形系 | 3.7 所望スペクトル信号の合成 |
| 1.3 離散時間系のインパルス応答 | 4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法 |
| 2. インパルス応答の測定原理 | 4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル |
| 2.1 離散フーリエ変換(DFT) | 4.2 帯域制限 |
| 2.2 測定信号を用いた測定 | 4.3 インパルス応答の切り出し |
| 3. 代表的測定信号 | 4.4 同期加算 |
| 3.1 測定信号と測定誤差 | 4.5 非正常雑音 |
| 3.2 測定信号の分類 | 5. 非線形性誤差 |
| 3.3 TSP | 5.1 (時不変)非線形による誤差 |
| 3.3.1 TSPの定義 | 5.2 時変性による誤差 |
| 3.3.2 TSPの時間-周波数特性 | 6. その他の誤差要因 |
| 3.3.3 TSPの高調波歪 | 7. 測定上の考慮点 |
| 3.4 Log-SS | 8. 測定時の注意点 |
| 3.4.1 Log-SSの定義 | ○ 8.1 AD・DA などの注意点 |
| 3.4.2 Log-SSの高調波歪 | 8.2 録音時の雑音 |
| 3.5 M系列信号 | 8.3 測定結果の評価 |
| 3.6 適応形スペクトルを持った信号 | 9. 測定信号が利用できない場合の測定
(最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル) |
| 3.6.1 雑音白色化信号 | 10. むすび |

255

8.1 AD・DA などの注意点



- ・測定結果には、DA と A/D の特性や影響が含まれる
- ・DA と A/D の特性を理解しておくことが重要

256

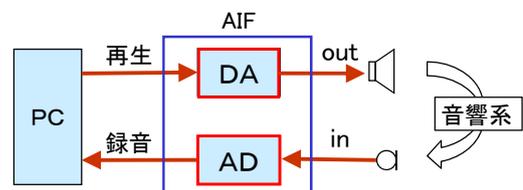
8.1 AD・DA などの注意点

- 8.1.1 PC と AD・DA の設定
- 8.1.2 AD・DA 間のクロストーク
- 8.1.3 AD と DA のクリッピング
- 8.1.4 AD と DA の折り返し現象
- 8.1.5 AD と DA の直流除去HPF
- 8.1.6 AD と DA の同期、サンプリング周波数

本節の話は、PC、サウンドデバイス、OS、ドライバ、などのソフト・ハードウェア環境に依存するので、必ずしも一般的でない話も含まれています

257

8.1.1 PC と AD・DA の設定



- ・PC 内臓の AD・DA は、雑音加わりやすい
 - ・外付け AIF(Audio Inter-Face) の利用が一般的
- ※ AIF の選択・評価は別稿

258

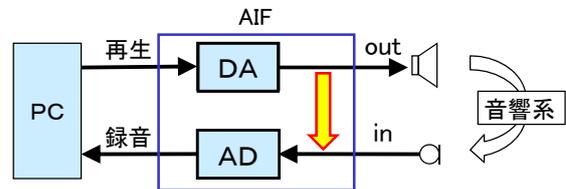
PC 設定上の注意など

- PC: 常駐ソフトはできるだけ外す
(ウイルス対策ソフトなど)
できれば計測ソフトの優先度をあげる
- AIF ドライバ:
Windows XP のドライバは勧められない
(AD・DAの同期性に問題)
ASIOは良 (MATLAB → pa_wavplayrecord)
- AD データの転送時損失
特に、多チャンネル、長時間録音時
(検出プログラムの利用)

不案内なので、調査ください
例えば、文献 [2.2]

259

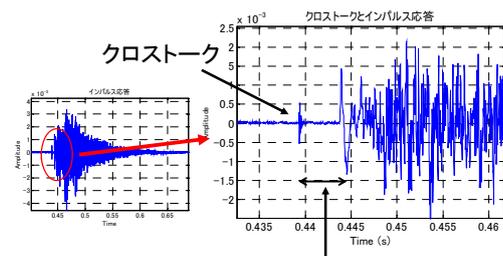
8.1.2 AD・DA 間のクロストーク



- DAされた信号が、電氣的結合(クロストーク)によって、AD信号に混入
- インパルス応答波形にプリエコー発生

260

クロストークの例

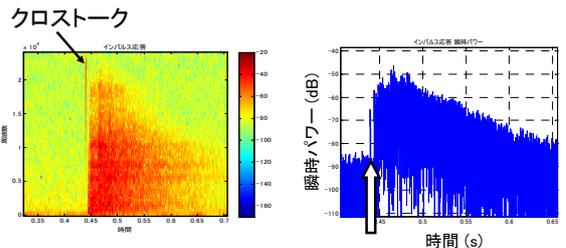


インパルス応答の直接音から約5ms前方
スピーカ・マイク間距離(1.7m)に相当

直接音と間違わないこと!

261

クロストークの特性と悪影響



スペクトログラムで見ると
高周波成分の強い
パルスとして観測される

直接音の開始時刻($t=0$)を誤検出
→ D値、C80、時間重心などの
室内音響パラメータの算出に
悪影響

262

クロストークの検出と対策

- マイクをOFFとして、測定プログラムを動かすことで、クロストークのみが測定できる
- クロストークの大小は AIF に依存 → AIF の選別

(対策)

- マイク受信信号は、AIF 内で増幅せず、外部でレベルを上げてから、AIFに入力するとクロストークの影響を低減できる。
- 手動やプログラムで、プリエコーを切り離す

263

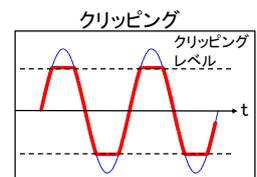
8.1.3 AD と DA のクリッピング

大きな非線形誤差要因

- ◇ AD 入力オーバーによるクリッピング
 - 録音波形表示、時間-周波数表示によるチェック
 - 必ずしも最大値(± 1 , $\pm 2^{15}$)ではないことがある。
(マイクアンプでのクリッピング、WinXP ドライバ[6.5])

- ◇ DA 出力時のクリッピング

- ・ $\Sigma \Delta$ 方式DAの場合
→ 次頁



264

DAで発生するクリッピング (1)

合成した測定信号 $s(k)$

なるべく大きな振幅 (←量子化誤差、DA電気雑音の影響小)
 $\Rightarrow s(k)$ の最大値を、デジタル最大値 (± 1 or $\pm 2^{15}$)
 (DAできる最大値)に正規化 することがある

↓

DA出力

しかし、この正規化は、クリッピングが発生する可能性あり

265

DAで発生するクリッピング (2)

266

クリッピングの原因

旧来型のDA

PC → 数列 → DA → アナログ LPF → 波形を再現(アナログ補間)

最近のオーバーサンプリング ($\Sigma \Delta$) 型のDA

PC → 数列 → 補間 → 補間デジタルフィルタ (オーバーサンプリング) → DAとオーバーサンプリング用アナログLPF → 出力

DA入力を最大値以下にするために補間後にクリッピングされる

267

防止方法

± 1 の M 系列信号 → 補間 → 最大値 2.5

± 0.4 の M 系列信号 → 補間 → 補間後の最大値がデジタル最大値を越えないように正規化すればよい

補間しても最大値が変わらないような信号 (SS信号など) では大丈夫

PN信号は注意 [6.3]

268

8.1.4 AD と DA の折り返し現象

再生 → DA → LPF HPF → out

録音 → AD ← LPF HPF ← in

LPF: 折り返し歪防止
 HPF: 直流成分カット

269

標本化定理 (サンプリング定理)

アナログ信号を 標本化してデジタル化 するとき、

信号の帯域幅 ($0 \sim f_{max}$)
 標本化周波数 f_s

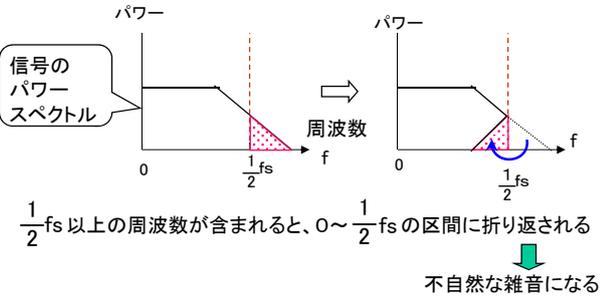
$$f_{max} < f_s/2$$

この条件を満たせば、原信号を再現できる。

270

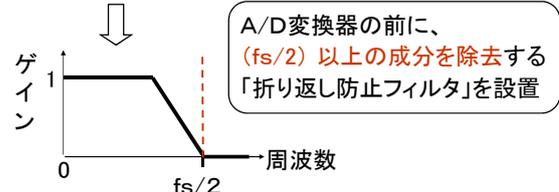
標本化定理が満たされないと

⇒ 折り返し歪み(エイリアシング)が発生



271

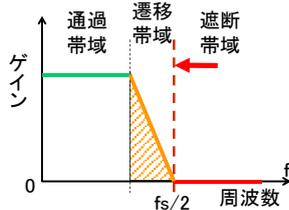
折り返し防止フィルタ



272

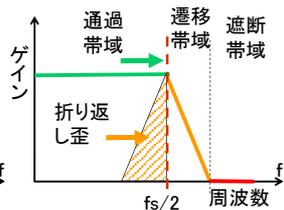
折り返し歪防止用 LPF の設計方針

従来の方針



$f_s/2$ 以上を遮断帯域
→ 折り返しは発生しない
→ $f_s/2$ 付近は特性低下

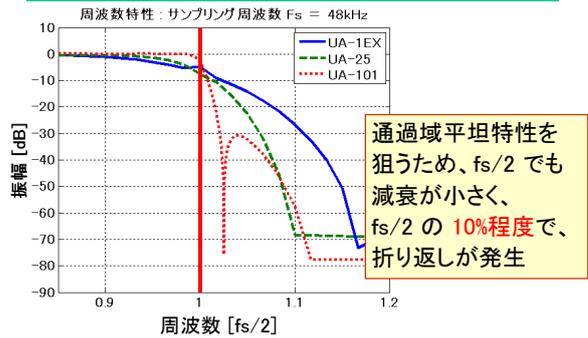
最近のAIFの方針



$f_s/2$ 以下を通過帯域
→ $f_s/2$ まで特性は平坦
→ 折り返しが発生

273

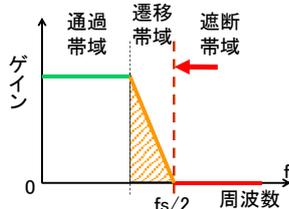
オーディオインタフェースのAD付属の折り返し防止フィルタ特性の測定例 [6.1]



274

折り返しを許容する理由

従来の方針

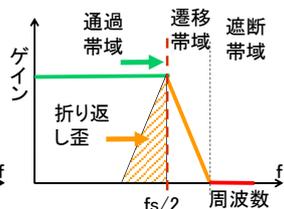


- $f_s/2$ まで平坦 → 見ばえが良い(?)
- どちらも、上限10%くらいは使えないのは同じ
- 聴覚上は、24kHz付近の折り返し歪は影響しない

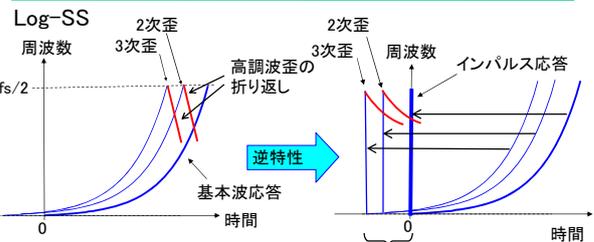
- しかし、計測上は、「無い」と「汚れた」では大きな違い

275

最近のAIFの方針



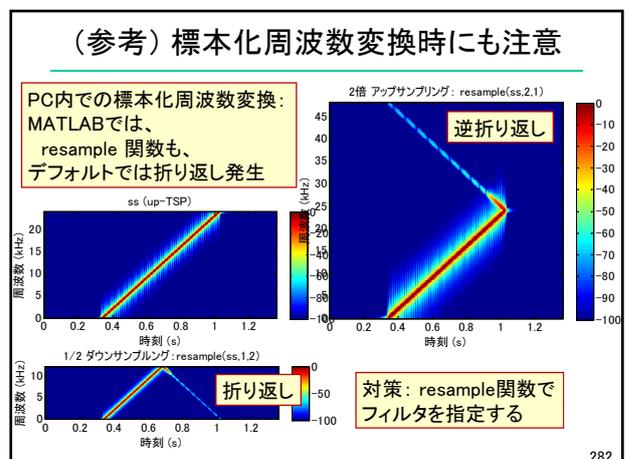
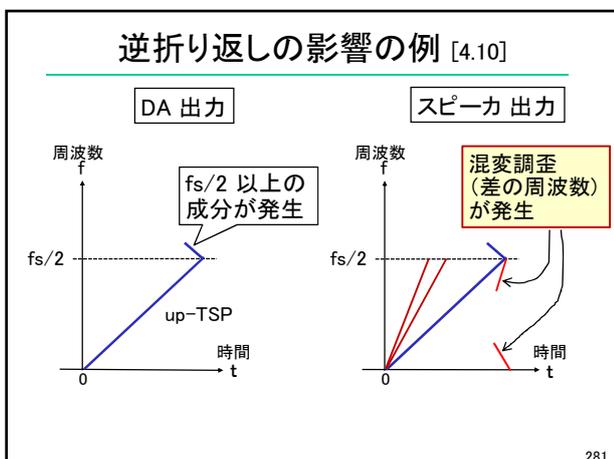
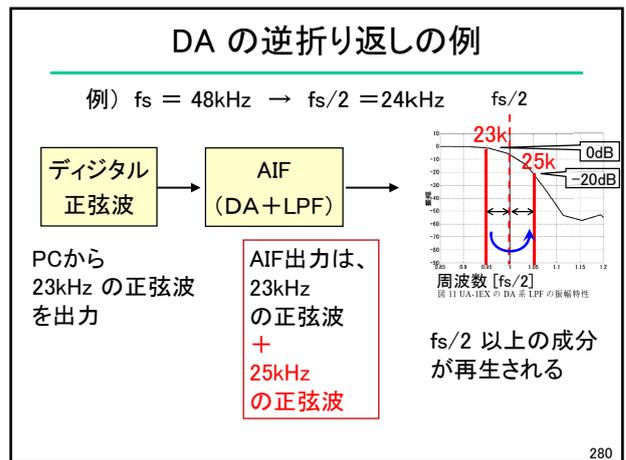
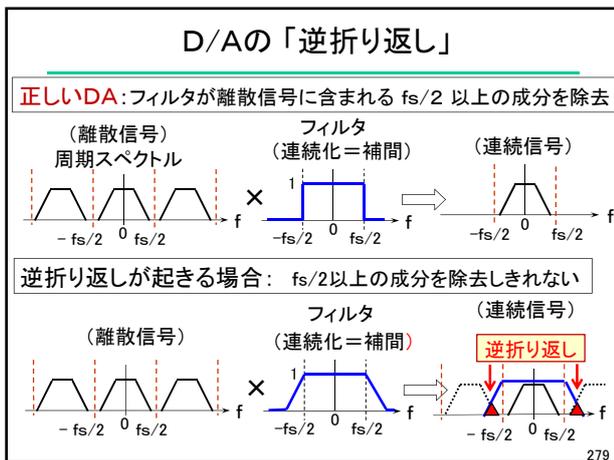
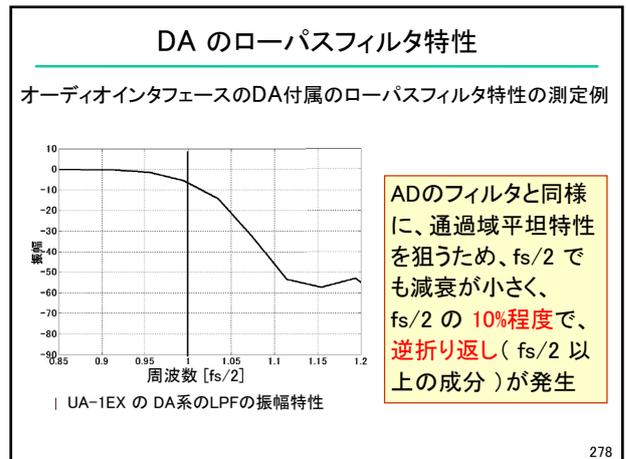
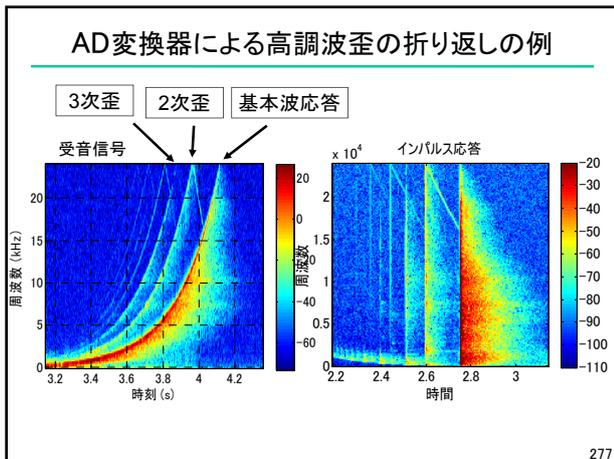
AD の折り返しによる誤差



- 高調波歪は、 $f_s/2$ 以上の成分を持つので、折り返し歪が発生

- 高調波間のすきまが埋まって切り出しが難しくなる
- インパルス応答の先頭があいまいになる

276



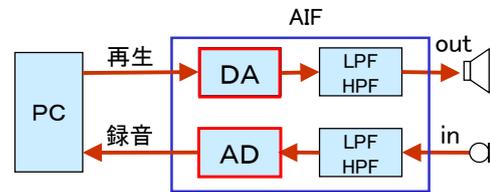
AIF フィルタの影響回避策

必須ではありませんが、折り返しの影響が無視できない場合は、

- ◇ DA の逆折り返し対策
 - ・ PC内で、逆折り返し防止デジタルフィルタを測定信号に適用
(例えば、 $f_s/2$ の90%をカットオフ、100%までを遷移域とするLPF)
 - ・ 信号の設計段階で、振幅成分を減衰させておく
- ◇ AD の折り返し対策
 - ・ 別途、アナログLPFを ADの前段に設置
 - ・ 録音後、折り返し発生帯域をカット

283

8.1.5 AD と DA の直流除去HPF



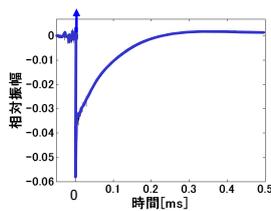
LPF: 折り返し歪防止

HPF: 直流成分カット

284

HPF 時間応答特性 [6.1]

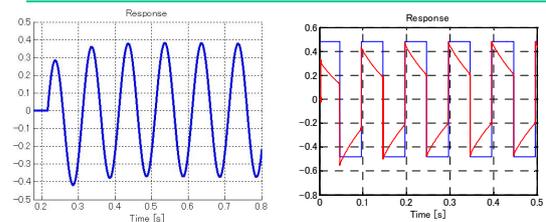
長時間継続する応答



- ・ 信号波形の立ち上がりが不連続だと、しばらく影響

285

時間波形の立ち上がり等に影響

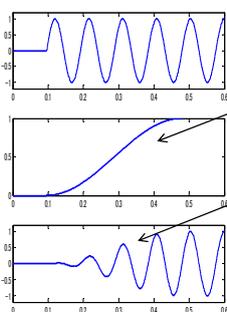


立ち上がりのレベルが変動

方形波が変形

286

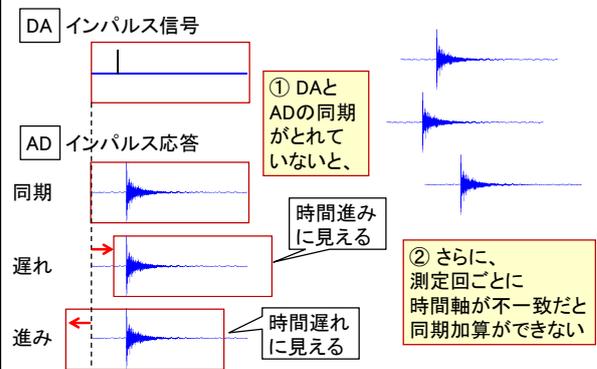
HPFの影響への対策



- ① 急な立ち上がりを持つ場合は、Half-cos 窓などをかけて測定信号の立ち上がりをゆるやかにする
- ② 録音信号の先頭から HPF の応答時間程度は利用しない
⇒ 一周期目を使いたくない理由

287

8.1.6 DAとADの同期性



① DAとADの同期がとれていないと、

時間進みに見える

時間遅れに見える

② さらに、測定回ごとに時間軸が不一致だと同期加算ができない

288

同期性のチェックと対策

[チェック方法]

- DA-AD を直結して、パルス音を発生させて時間ずれ(遅延・進み時間)を測定・把握する
 - パルスに 0 を付加し、実使用信号長にして測定 (見本プログラム: DA_AD_sync_01.m)
- 時間ずれは ⇒ 「ない」「一定」「ほぼ一定」「毎回異なる」
- PCの状態やDA・ADデータ数によって遅れ時間は異なることがある

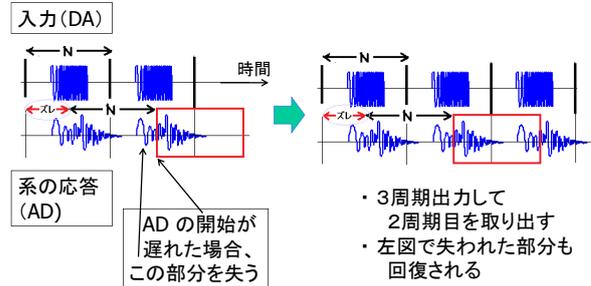
[対策]

- 一定のずれは補正可能
- ずれが一定でない場合、同期加算は、N回分の測定を単一データで行う



289

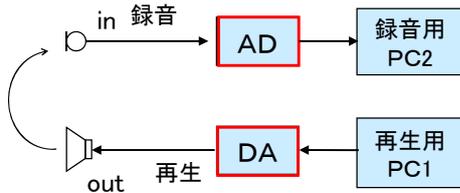
AD の遅れは問題となる



AD の遅延がほぼ一定の場合は、DAデータの先頭にゼロを付加して調整する事も可能

290

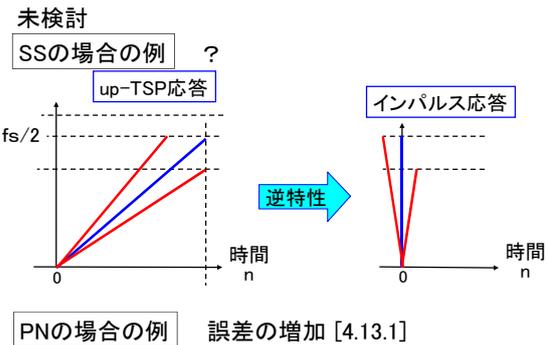
2台のPCで測定する場合



- 再生場所と録音場所が離れている場合
- PC1 の DA と、PC2 の AD との同期問題に加えてサンプリング周波数が微妙に違う場合がある
一例: 1.5秒に1サンプルのズレ [4.13.2]

291

サンプリング周波数の違いの影響



292

サンプリング周波数の違いへの対策

未検討

- ズレの計測は、正弦波+うなり
- 補正はリサンプル?

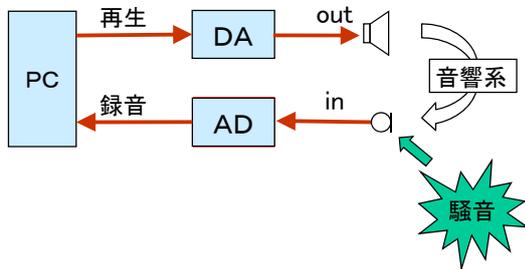
293

目次

1. インパルス信号とインパルス応答	3.6.2 雑音最小化信号
1.1 インパルス信号	3.6.3 SN比を一定とする信号
1.2 インパルス応答と線形系	3.7 所望スペクトル信号の合成
1.3 離散時間系のインパルス応答	4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
2. インパルス応答の測定原理	4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
2.1 離散フーリエ変換(DFT)	4.2 帯域制限
2.2 測定信号を用いた測定	4.3 インパルス応答の切り出し
3. 代表的測定信号	4.4 同期加算
3.1 測定信号と測定誤差	4.5 非定常雑音
3.2 測定信号の分類	5. 非線形性誤差
3.3 TSP	5.1 (時不変)非線形による誤差
3.3.1 TSPの定義	5.2 時変性による誤差
3.3.2 TSPの時間-周波数特性	6. その他の誤差要因
3.3.3 TSPの高調波歪	7. 測定上の考慮点
3.4 Log-SS	8. 測定時の注意点
3.4.1 Log-SSの定義	8.1 AD・DAなどの注意点
3.4.2 Log-SSの高調波歪	○8.2 録音時の雑音
3.5 M系列信号	8.3 測定結果の評価
3.6 適応形スペクトルを持った信号	9. 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
3.6.1 雑音白色化信号	10. むすび

294

8.2 録音時の雑音



295

気をつけたほうがよい雑音と注意

▷聞こえない雑音

- ・低周波騒音
- ・電氣的雑音（ハムなど）→ 混交調歪の要因にも
- ・固体伝播音（機材の振動など）

▷突発性雑音（瞬間的な音、ガタツ、カチツ）

▷背景雑音を録音しておくこと

（再生音の最初または最後に数秒の無音再生を行い、その時に背景騒音を録音する）

参考：実験時の写真を撮っておく

（機器配置・ボリュームなど）

296

・聴覚的に気にならない低周波雑音が大きく含まれている場合（時間-周波数特性では見づらい）は、録音後にフィルタで低域カットするのが良い。

297

目次

1. インパルス信号とインパルス応答	3.6.2 雑音最小化信号
1.1 インパルス信号	3.6.3 SN比を一定とする信号
1.2 インパルス応答と線形系	3.7 所望スペクトル信号の合成
1.3 離散時間系のインパルス応答	4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
2. インパルス応答の測定原理	4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
2.1 離散フーリエ変換(DFT)	4.2 帯域制限
2.2 測定信号を用いた測定	4.3 インパルス応答の切り出し
3. 代表的測定信号	4.4 同期加算
3.1 測定信号と測定誤差	4.5 非定常雑音
3.2 測定信号の分類	5. 非線形性誤差
3.3 TSP	5.1 (時不変)非線形による誤差
3.3.1 TSPの定義	5.2 時変性による誤差
3.3.2 TSPの時間-周波数特性	6. その他の誤差要因
3.3.3 TSPの高調波歪	7. 測定上の考慮点
3.4 Log-SS	8. 測定時の注意点
3.4.1 Log-SSの定義	8.1 AD・DAなどの注意点
3.4.2 Log-SSの高調波歪	8.2 録音時の雑音
3.5 M系列信号	○8.3 測定結果の評価
3.6 適応形スペクトルを持った信号	9. 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
3.6.1 雑音白色化信号	10. むすび

298

8.3 測定結果の評価

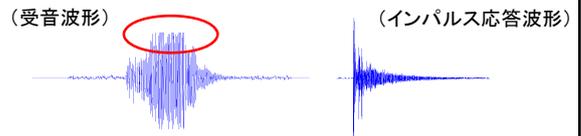
・測定直後に、測定したインパルス応答の質の評価(良・不良のチェック)を行うと良い

- ① 波形のチェック
- ② スペクトログラム(時間一周波数特性)によるチェック
- ③ 雑音のチェック

299

① 波形のチェック(1)

・波形クリッピングのチェック



マイクロホンアンプの保護回路によるクリッピング → PCでは最大振幅とならない

クリッピングのチェックはインパルス応答波形からはわからない

300

① 波形のチェック (2)

PN信号は、非線形誤差と雑音性誤差の区別がしづらい。
M系列信号などでは、非線形が発生したら後半にパルス状の雑音

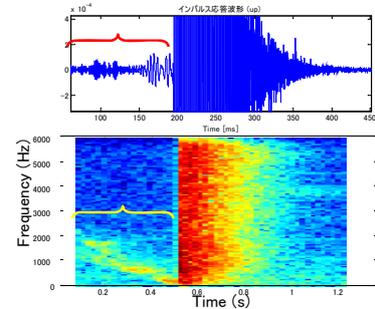


301

② スペクトログラムによるチェック (1)

- 特に、SS の場合、系の応答(観測信号)と、**時間-周波数特性**の表示が有効
- 高調波歪、非定常雑音、などの不良現象が検出できる

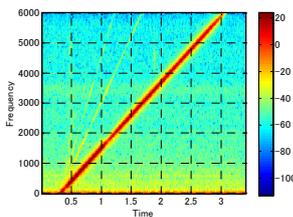
波形では原因不明な誤差がよく理解できる



302

② スペクトログラムによるチェック (2)

受信波形の方が、より理解しやすい



スピーカにもよるが、意外と低い再生レベルで非線形が発生

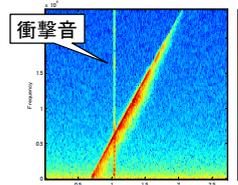
低レベルの高調波はあまり気にしなくても良いかも

303

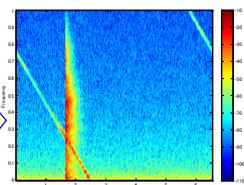
② スペクトログラムによるチェック (3)

非定常雑音も、受信波形の方が理解しやすい

(受信信号)



(インパルス応答)

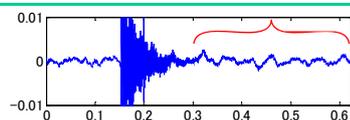


最低限、インパルス応答のスペクトログラムでのチェックは行うことを勧める

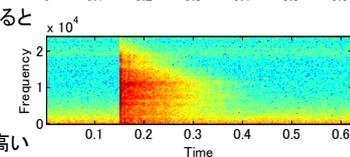
304

③ 雑音のチェック

波形のチェック
大きな雑音成分が観測される



スペクトログラムで見ると
低周波雑音であることがわかる

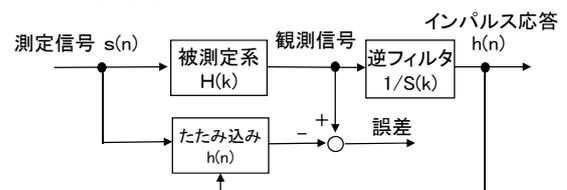


必要に応じて、DFTにより分解能の高い周波数分析を行い、不要な帯域であれば、録音後にフィルタで低域カットするのが良い。

305

検討中: より厳密な品質評価方法

- 異なる測定信号での測定結果との比較
SS は次数を変え、PN は位相を変える
2つの測定結果の差が誤差成分
- 測定したインパルス応答を測定信号とたたみ込んで観測信号と比較 (波形精度が必要な場合)



細かい評価は目的に依存

306

「8章 測定時の注意点」のまとめ

- 聞こえない雑音に注意
- クロストークに注意
- ADのクリッピング、DAのクリッピングに注意
DAはPN信号の場合
- ADの折り返し歪、DAの逆折り返し歪に注意
- 対策は、折り返し防止 LPFを自分で用意
- DAとADの同期性の不良も誤差の原因となる
特にADの遅れ、サンプリング周波数の不一致
- 測定結果の品質をチェックして、評価しておく
SS の場合、時間周-波数表示(スペクトログラム)

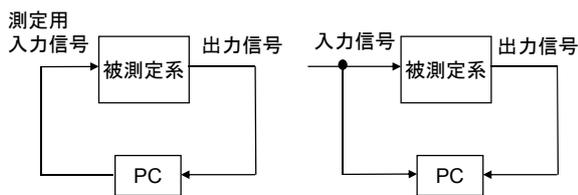
307

目次

- インパルス信号とインパルス応答
 - インパルス信号
 - インパルス応答と線形系
 - 離散時間系のインパルス応答
- インパルス応答の測定原理
 - 離散フーリエ変換(DFT)
 - 測定信号を用いた測定
- 代表的測定信号
 - 測定信号と測定誤差
 - 測定信号の分類
 - TSP
 - TSPの定義
 - TSPの時間-周波数特性
 - TSPの高調波歪
 - Log-SS
 - Log-SSの定義
 - Log-SSの高調波歪
 - M系列信号
- 適応形スペクトルを持った信号
 - 雑音白色化信号
 - 雑音最小化信号
 - SN比を一定とする信号
 - 所望スペクトル信号の合成
- 雑音性誤差と誤差抑圧方法
 - 測定信号のエネルギーとスペクトル
 - 帯域制限
 - インパルス応答の切り出し
 - 同期加算
 - 非定常雑音
- 非線形性誤差
 - (時不変)非線形性による誤差
 - 時変性による誤差
- その他の誤差要因
- 測定上の考慮点
- 測定時の注意点
 - AD・DAなどの注意点
 - 録音時の雑音
 - 測定結果の評価
- 測定信号が利用できない場合の測定
(最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
- おわりに

308

測定信号が利用できない場合



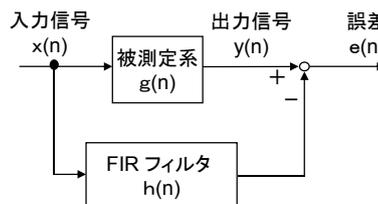
測定用入力信号を利用できる場合
SS, PN

測定用入力信号を利用できない場合

- 最小二乗法
- 適応フィルタ
- クロススペクトル

309

最小二乗法



- 入力信号 $x(n)$ と出力 $y(n)$ は観測できる
- この時、誤差 $e(n)$ の二乗和を最小にするような FIR フィルタを求める。
- FIR フィルタの係数(インパルス応答)が、被測定系のインパルス応答 $g(n)$ の近似値となる。

310

最小2乗法の行列解法(たたみ込み行列 X)

信号 $[x(0), x(1), x(2), x(3), \dots, x(N-1), x(N)]$ を縦ベクトルとして、1段ずつずらして並べた行列

$$X = \begin{bmatrix} x(0) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ x(1) & x(0) & 0 & & \vdots \\ x(2) & x(1) & x(0) & & 0 \\ x(3) & x(2) & x(1) & x(0) & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ x(N) & x(N-1) & x(N-2) & \dots & x(0) \\ 0 & x(N) & x(N-1) & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & x(N) & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & x(N) \end{bmatrix}$$

311

たたみ込み行列演算

$$X \begin{bmatrix} \underbrace{\hspace{10em}}_{L+1} \\ x(0) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ x(1) & x(0) & 0 & & \vdots \\ x(2) & x(1) & x(0) & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(N) & & & & x(0) \\ 0 & x(N) & & & \vdots \\ 0 & 0 & x(N) & & \vdots \\ & & 0 & \dots & x(N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(0) \\ h(1) \\ h(2) \\ \vdots \\ h(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}$$

フィルタベクトル $h = [h(0), h(1), h(2), \dots, h(L)]$ との積はたたみ込みになっている

$L+1$
 L : フィルタ長
> 予想されるインパルス応答長

例えば
3行目 $= x(2)h(0) + x(1)h(1) + x(0)h(2)$

行列は、縦長行列

312

たたみ込みを表す行列方程式

$$y(k) = x(k) * h(k)$$

(出力) (入力) (フィルタ)

$$y = X h$$

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N+L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(0) & 0 & 0 & 0 \\ x(1) & x(0) & 0 & \\ x(2) & x(1) & x(0) & \\ \vdots & \vdots & & \ddots \\ x(N) & & & x(0) \\ 0 & x(N) & & \vdots \\ 0 & 0 & x(N) & \\ 0 & & 0 & \ddots & x(N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(0) \\ h(1) \\ h(2) \\ \vdots \\ h(L) \end{bmatrix}$$

xとyが与えられた時、方程式を満たすような未知数hを求める。

313

最小2乗原理に基づく計算法

$$y = X h$$

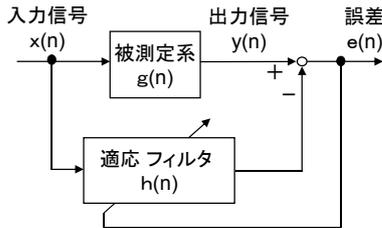
Xが縦長行列なので、この方程式を満たす解hは存在しないが、 $(y - Xh)$ の2乗誤差を最小にするhは、次式で求められる

$$h = (X^T X)^{-1} X^T y \quad T: \text{転置}$$

- $(X^T X)^{-1}$ の逆行列演算の悪条件を避けるために、対角成分に微量を加算すると良い
- 想定されるインパルス応答の長さLが大きすぎる場合、逆行列演算が実行できない場合がある
(対策1) 共役勾配法などの逐次近似演算
(対策2) 適応フィルタの利用

314

適応フィルタの利用 [7.1] [7.2]



• 適応フィルタの係数が、被測定系のインパルス応答 $g(n)$ の近似値となる。

315

適応アルゴリズム [7.1] [7.2]

- ① $x(n) = [x(n), x(n-1), x(n-2), \dots, x(n-L)]^T$
- ② $e(n) = y(n) - h(n)^T x(n)$
- ③ $h(n+1) = h(n) + \frac{\alpha}{x(k)^T x(k) + \beta} e(n) \cdot x(n)$

学習同定法

α : ステップサイズ ($0 < \alpha \leq 1$), β : 微量

誤差が十分に小さくなるまで、同一入出力信号を利用してアルゴリズムを繰り返す。その際、 α を少しずつ小さくするとよい。

316

クロススペクトル法 [7.3]



入力自己相関関数

$$\phi_{xx}(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N x(i) \cdot x(i+\tau)$$

入出力相互相関関数

$$\phi_{xy}(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N x(i) \cdot y(i+\tau)$$

入出力関係

$$y(n) = \sum_{j=0}^{\infty} x(n-j) \cdot g(j)$$

入出力相互相関(y代入)

$$\phi_{xy}(\tau) = \sum_{j=0}^{\infty} \phi_{xx}(\tau-j) \cdot g(j)$$

ϕ_{xy} は ϕ_{xx} と g との畳み込み

317

クロススペクトル法

ϕ_{xy} は ϕ_{xx} と g との畳み込み

これをフーリエ変換して、

$$\Phi_{xy}(k) = \Phi_{xx}(k) \cdot G(k)$$

これより、被測定系の周波数特性が、

$$G(k) = \frac{\Phi_{xy}(k)}{\Phi_{xx}(k)}$$

と、求まる。

ペリオドグラム (平均スペクトル) として求める方法もある

$\Phi_{xy}(k)$ は $x(n)$ と $y(n)$ のクロススペクトルと呼ばれる。

$\Phi_{xy}(k)$
有限長の相互相関のDFTで近似

$\Phi_{xx}(k)$
有限長の自己相関のDFTで近似

318

「9章 測定信号が利用できない場合の測定」 のまとめ

- ・ 最小二乗法
正確だが、演算量が必要
- ・ 適応フィルタ
もっとも簡単
- ・ クロススペクトル法
直線たたみ込みをDFTスペクトルの積で表すため誤差が発生

測定信号を利用する場合と比べて
誤差は大きい

319

目次

1. インパルス信号とインパルス応答	3.6.2 雑音最小化信号
1.1 インパルス信号	3.6.3 SN比を一定とする信号
1.2 インパルス応答と線形系	3.7 所望スペクトル信号の合成
1.3 離散時間系のインパルス応答	4. 雑音性誤差と誤差抑圧方法
2. インパルス応答の測定原理	4.1 測定信号のエネルギーとスペクトル
2.1 離散フーリエ変換(DFT)	4.2 帯域制限
2.2 測定信号を用いた測定	4.3 インパルス応答の切り出し
3. 代表的測定信号	4.4 同期加算
3.1 測定信号と測定誤差	4.5 非定常雑音
3.2 測定信号の分類	5. 非線形性誤差
3.3 TSP	5.1 (時不変)非線形による誤差
3.3.1 TSPの定義	5.2 時変性による誤差
3.3.2 TSPの時間-周波数特性	6. その他の誤差要因
3.3.3 TSPの高調波歪	7. 測定上の考慮点
3.4 Log-SS	8. 測定時の注意点
3.4.1 Log-SSの定義	8.1 AD・DAなどの注意点
3.4.2 Log-SSの高調波歪	8.2 録音時の雑音
3.5 M系列信号	8.3 測定結果の評価
3.6 適応形スペクトルを持った信号	9. 測定信号が利用できない場合の測定 (最小二乗法、適応フィルタ、クロススペクトル)
3.6.1 雑音白色化信号	○10. むすび

320

むすび (1)

測定信号の選択や評価は、目的や環境に依存する

目的

- ・ 欲しいのはインパルス応答か、周波数特性か
- ・ エネルギー曲線がわかれば良い(残響時間など)
- ・ 波形を正確に測定したい(許容誤差)
- ・ 非線形特性が含まれても良い、困る
- ・ 雑音区間の情報を利用するか？(残響時間、雑音抑圧)
- ・ 測定に要する時間 はできるだけ短くか、こだわらないか

環境

- ・ SN比は低い、比較的高い、高い
- ・ スピーカの非線形形の大小
- ・ 非定常雑音 有無
- ・ 風の影響 有無
- ・ インパルス応答は長い、短い

321

むすび (2)

測定信号の選択や評価は、目的や環境に依存する

例えば、

- ・ 非定常雑音が多く存在 → PN信号 が適
- ・ 風や変の影響 → PNは雑音レベルが上昇
→ 残響時間には不適
→ 波形精度はSS信号よりPNが上
- ・ 室内音響特性測定
→ 多くの場合、スピーカが歪んでも大音量が有利

など、

定常雑音性誤差に関しては、

測定信号との雑音抑圧効果の定量的関係が求められる。

322

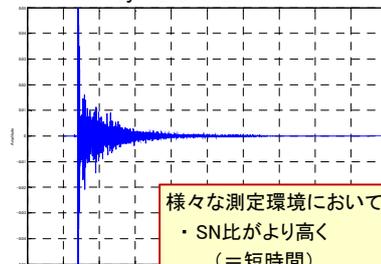
むすび (3)

- ◇ 一般的には Log-SS の利用が望ましいと思える
 - ・ 平均的な室内騒音に対して、最適(雑音最小)に近い
 - ・ 高調波歪の影響を取り除きやすい
- ◇ 70点以上の測定は可
- ◇ より高精度の結果や測定時間短縮を望む場合は、
細かいパラメータ対応や
MN、CSN などの適応形信号を利用
- ◇ 測定結果は、時間-周波数特性(MATLAB= spectrogram)
で確認を！(解決困難な誤差はご相談ください)

323

インパルス応答測定の研究の目標

by TDU in 2013



様々な測定環境において

- ・ SN比がより高く
(=短時間)
- ・ 不自然な測定誤差の少ない
インパルス応答測定の実現

324