

# プレフィルタリングによるアンテナの周波数特性歪み補償

白鳥 裕介      藤元 美俊      堀 俊和

福井大学 工学部 〒910-8507 福井市文京 3-9-1

E-mail: white-bird@wireless.fuis.fukui-u.ac.jp

**あらまし** UWB (Ultra Wide Band) 通信では非常に広い周波数帯域を使用し通信を行うため、アンテナにも広帯域な周波数特性が要求される。しかし、UWB 通信で使用する全帯域において一様な周波数特性を持つアンテナを実現することは困難であり、アンテナの周波数特性が歪むことによりアンテナからの出力信号波形が歪み、通信品質の劣化を招く。本報告では、アンテナから信号を送信する前に、アンテナの周波数特性を考慮して入力信号を整形することで、アンテナから出力される信号波形の歪みを補償するシステムを提案する。提案システムをトランスバーサルフィルタで構成し、計算機シミュレーションを行うことにより、提案システムによるアンテナからの出力信号波形歪みの補償効果を示す。

**キーワード** UWB, アンテナ利得, 歪み, トランスバーサルフィルタ

## Compensation of Antenna Frequency Characteristics distortion by Pre-filtering

Yusuke SHIRATORI      Mitoshi FUJIMOTO      Toshikazu HORI

Faculty of Engineering, University of Fukui, 3-9-1, Bunkyo, Fukui, 910-8507 Japan

E-mail: white-bird@wireless.fuis.fukui-u.ac.jp

**Abstract** Since very wide frequency band is utilized in the Ultra Wide Band (UWB) communication scheme, wideband characteristics are required for also antennas. However, it is difficult to obtain the antenna which has uniform characteristics in all frequency band of UWB. Thus the communication quality tends to become worse because of distortion of antenna frequency characteristics. In this paper, a new method which compensates the distortion due to the antenna characteristics before transmitting through the antenna is proposed. Numerical results show that the proposed method composed of the transversal filter is effective for compensating the distortion.

**Keyword** UWB, antenna gain, distortion, transversal filter

## 1. まえがき

近年、携帯電話や無線 LAN などの無線アクセス技術の発展が目覚しく、更なる大容量・高品質な通信技術の確立が期待されている。しかし、無線通信に利用可能な周波数は有限であるため、周波数の効率的な利用が必要不可欠である。そこで、既存のシステムと周波数を共用し、広い周波数帯域を使用することで大容量通信を行う UWB (Ultra Wide Band) 通信方式が注目されている。UWB は、FCC (米連邦通信委員会) の規定によれば、比帯域幅が中心周波数の 20% 以上、または 500MHz 以上の帯域幅を使用する無線通信と定義されており、1Gbit/s の伝送速度を達成できることから、次世代の高速大容量近距離無線通信として期待されている [1]。

UWB 通信方式は広帯域な信号を取り扱うため、広帯域な周波数特性を持つアンテナが必要不可欠である。しかし、広帯域な周波数特性を持ち、かつ、一様な周波数特性を持つアンテナの実現は難しい [2]。また、アンテナの老朽化や、アンテナが置かれている環境の変化などによっても、周波数特性が変化する。これらの要因により、送信信号の波形が本来送信したい信号波形と違うものとなり、通信品質の劣化を招くことになる。

本報告では、送信側でアンテナの周波数特性を考慮し、信号波形をあらかじめ整形することにより、アンテナから送信される波形の歪みを軽減する手法 (プレフィルタリング) を提案する。また、計算機シミュレーションを通して、フィルタに入力される信号の SNR, ならびにフィルタのタップ数が提案方式の効果に及ぼす影響について検討した結果を示す。

## 2. プレフィルタリングによる歪み補償

### 2.1. アンテナの周波数特性による波形歪み

UWB 通信方式には、スペクトル拡散通信において拡散チップ長を短くする直接拡散 UWB 方式、帯域を複数に分割するマルチバンド OFDM 方式などがあるが、ここでは数百ピコセカンドほどの

非常に短いインパルス状の信号をアンテナから直接送受信する Impulse Radio 方式を考える [3][4]。

図 1 に、アンテナ利得の周波数特性が歪んでいる時のアンテナ送信パルスの周波数特性歪みの概念を示す。送信機出力パルスの振幅スペクトルを  $X(f)$ 、アンテナの周波数特性を  $A(f)$  とする。この時、アンテナ送信パルスの振幅スペクトル  $Z(f)$  は、次式で示されるようにアンテナの周波数特性の影響を受け歪んでしまう。

$$Z(f) = X(f) \times A(f) \quad (1)$$

アンテナ送信パルスの周波数特性が変化することによって、その時間波形に歪みが生じ、通信品質の劣化につながる。

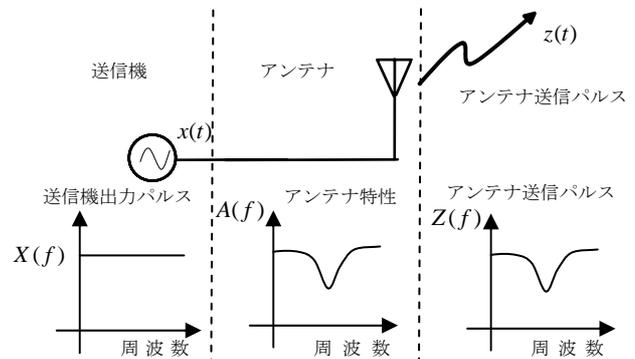


図 1 アンテナ送信パルスの周波数特性歪み

### 2.2. 波形歪み補償法

ここでは、アンテナ送信パルスの歪み補償方法を考える。図 2 に、送信信号の波形歪みを低減するためのシステム (提案フィルタ) の概念を示す。フィルタの周波数特性を  $F(f)$  とすると、フィルタを介した時のアンテナ送信パルスの振幅スペクトル  $Z_{ft}(f)$  は次式のようになる。

$$Z_{ft}(f) = X(f) \times F(f) \times A(f) \quad (2)$$

ここで、フィルタの周波数特性をアンテナの周波数特性の逆数となるように設定する。

$$F(f) = 1/A(f) \quad (3)$$

フィルタを介した時のアンテナ送信パルスの振幅スペクトル  $Z_{ft}(f)$  は、(2)式および(3)式より

$$Z_{ft}(f) = X(f) \times (1/A(f)) \times A(f) = X(f) \quad (4)$$

となり、プレフィルタリングを行うことにより、アンテナ送信パルスの周波数特性を送信機出力パルスの周波数特性と同じ特性に補償できる。

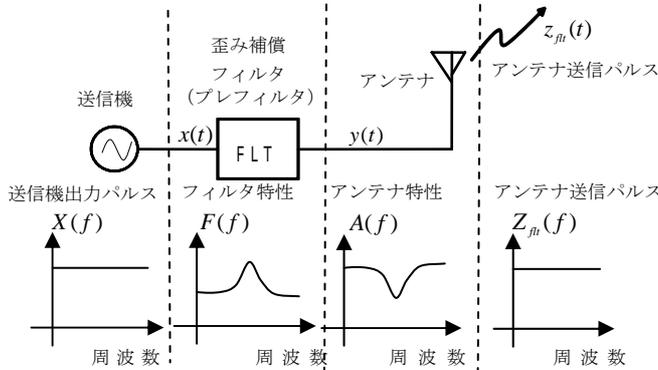


図2 プレフィルタリングを用いた周波数特性歪み補償

ただし、完全に補償するためには、高精度なフィルタリングが必要となるが、現実には、有限精度、有限インパルス応答のフィルタを用いることになり、実際のフィルタで十分な補償効果が得られるか否か不明である。

### 3. シミュレーションモデル

#### 3.1. 入力信号

計算機シミュレーションに用いた送信機出力パルスのスペクトルを図3に示す。図3に示すように、3.1GHz~10.6GHzの帯域付近に集中しているものとしている。スペクトルの両端は、3.1GHzおよび10.6GHzを3dBカットオフ周波数とし、その周辺はロールオフ率0.5のナイキスト特性としている。上側のカットオフ周波数である10.6GHzに対して少なくとも2倍以上のサンプリングとするため、サンプリング周波数は32Gsample/secとしている。このスペクトルを逆フーリエ変換することによって、UWBの帯域を使用する送信機出力パルスを作成する。その時間波形を図4に示す。

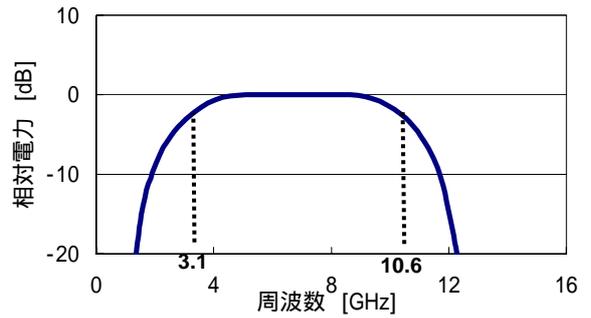


図3 送信機出力パルス波形の電力スペクトル

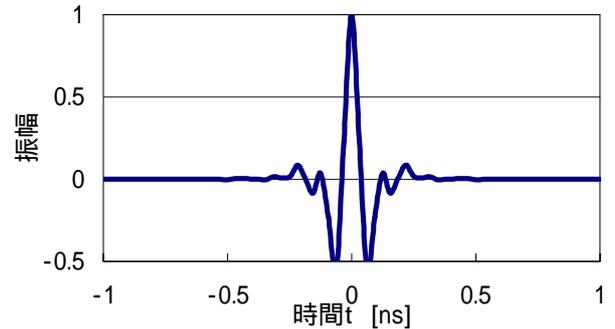


図4 送信機出力パルス波形

#### 3.2. アンテナ利得の周波数特性モデル

図5に、アンテナ利得の周波数特性のモデルを示す。アンテナの周波数特性は、中心周波数  $f_0$  の利得  $G_0$  と周波数特性の歪み係数  $G_1$  の2つのパラメータを用いて(5)式に基づいて設定した。なお、アンテナの位相特性は、アンテナの周波数特性の利得が負となる周波数においては、位相が反転することになる。

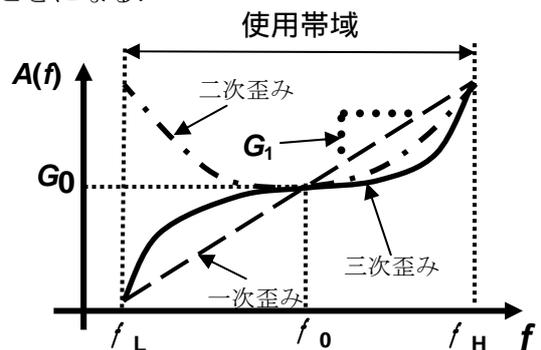


図5 アンテナの周波数特性のモデル

$$A(f) = A(x) = G_1 * x^n + G_0$$

$$x = \frac{2(f - f_0)}{f_k - f_L} \quad (5)$$

ここで、 $n$ 次特性:  $n=1, 2, 3$  である

計算機シミュレーションではアンテナの周波数特性の歪みとして、一次歪み (図5破線)、二次歪み (図5一点鎖線)、および三次歪み (図5実線) の場合に分けて考えた。

### 3.3. プレフィルタの構成

プレフィルタの構成は、トランスバーサルフィルタとする。フィルタの周波数特性  $F(f)$  をアンテナ利得の周波数特性  $A(f)$  の逆特性とするために、(6)式に示すように、フィルタの周波数特性を逆フーリエ変換した値をフィルタのタップ係数  $w_f(t)$  とする。

$$w_f(t) = \mathcal{F}^{-1}\{F(f)\} = \mathcal{F}^{-1}\{1/A(f)\} \quad (6)$$

ここで、アンテナのインパルス応答を  $h_a(t)$  とするとアンテナから送信される出力パルス  $z_{ft}(t)$  は、入力信号  $x(t)$  と  $w(t)$  の畳み込みに更に  $h_a(t)$  を畳み込んだ信号となり、次式で表される[5]。

$$z_{ft}(t) = \sum_{m=0}^T \sum_{n=0}^T x(n)w_f(m-n)h_a(t-m) \quad (7)$$

## 4. シミュレーションによる補償効果の検討

### 4.1. 評価指標

評価指標として、本来送信したい信号と実際にアンテナから送信される信号との平均自乗誤差 (MSE : Mean Square Error) を用いた。送信機出力パルス波形とアンテナ送信パルス波形が全く同じであれば、MSE の値はゼロとなる。

### 4.2. フィルタによる補償効果

フィルタのタップ数を 64、フィルタに入力する信号の SNR を 50dB とし、アンテナの周波数特性歪み係数  $G_1$  と中心周波数の利得  $G_0$  をパラメータとしてシミュレーションを行った。アンテナの周波数特性歪み  $G_1$  と MSE の比との関係を図6に示す。図6 (a), 図6 (b), および図6 (c) は、アンテナ利得の周波数特性をそれぞれ一次歪み、二次歪み、および三次歪みとした場合である。縦軸の MSE の比 [dB] は、補償フィルタを介した場合の MSE と補償フィルタを介さない場合の MSE の比であり、(8)式に基づいて求めた。この値が正値であれば補償フィルタによってアンテナ送信パルス波形の歪みが軽減されたことを示している。

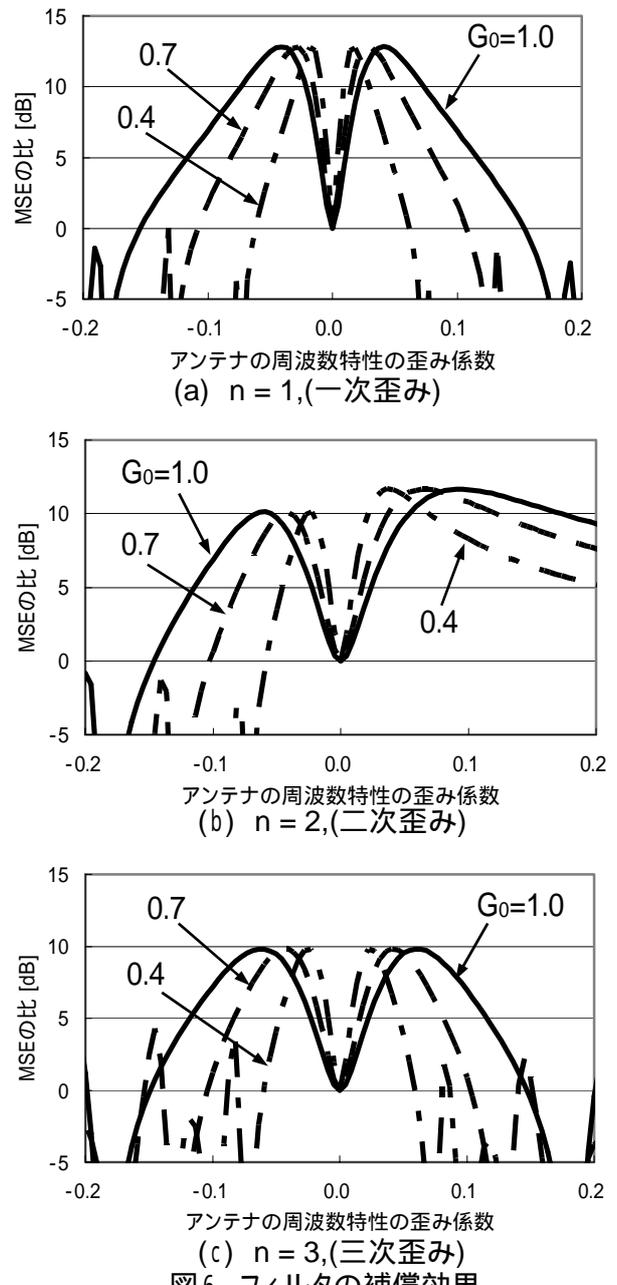


図6 フィルタの補償効果

$$MSEの比 = 10 \times \log_{10} \left( \frac{\text{フィルタ無しの場合のMSE}}{\text{フィルタ有りの場合のMSE}} \right) \quad \dots\dots (8)$$

図6より、歪み係数の絶対値  $|G_1|$  があまり大きくなければ MSE の比が正値となり、波形歪みが補償されることがわかる。しかし、 $G_1$  の絶対値が大きい、すなわちアンテナの周波数特性歪みが大きくなると、MSE の比が負となり、かえってフィルタが逆効果となる。また、中心周波数の利得  $G_0$  が大きい方が大きな周波数特性歪みまで補償できることがわかる。

図6において、 $G_1$ の値をゼロから増加もしくは減少させて、MSEの比の値が初めて負となる $G_1$ の値までの範囲を、以下フィルタの補償範囲と呼ぶことにする。図6(b)を見ると、 $G_1$ の値が負である方が正の値である場合に比べ、フィルタの補償範囲が狭い。また $G_1$ の値が負の場合は、一次歪み、二次歪み、および三次歪みのいずれの歪みにおいても同程度の補償範囲が得られるが、 $G_1$ の値が正の場合、二次歪み(図6(b))のみ補償範囲が広がる。このことをアンテナ利得の周波数特性の概念図(図7)を用いて説明する。 $G_1$ の値が負である場合(図7(a))、一次歪み、二次歪み、および三次歪みのいずれの周波数特性歪みにおいても、使用する帯域内の最高周波数において同じ大きさの利得かつ最低利得となる。しかし、 $G_1$ の値が正である場合(図7(b))は、一次と三次歪みの場合は最低周波数において最低利得となるが、二次歪みの場合は、中心周波数で最低利得となり、一次歪み、および三次歪みの場合の最低利得よりも利得が大きくなる。つまり、 $G_1$ の値が正である二次歪みの場合のみ帯域内の最低利得が大きくなる。このことから、フィルタの補償範囲は、帯域内の最低利得の大きさに依存し、帯域内の利得が極端に低下すると、フィルタが逆効果になると考えられる。

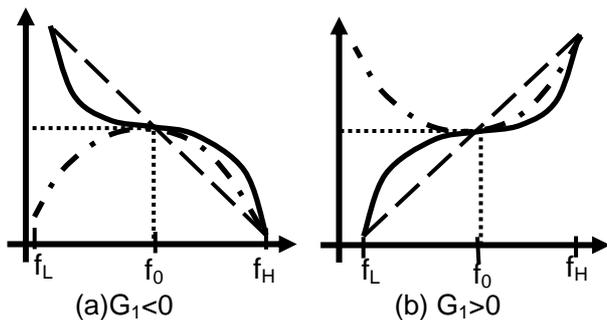


図7  $G_1$ の値によるアンテナ利得の変化

#### 4.3. SNRが補償効果に及ぼす影響

ここでは、フィルタの補償効果に対するSNRの影響を検討する。図8はアンテナの周波数特性を1次歪みとした時の、中心周波数の利得 $G_0$ とフィルタにより補償できる最大の歪み係数 $|G_1|_{max}$ の関係を示しており、パラメータはフィルタに入力する信号のSNRである。図8より、フィルタに入

力する信号のSNRが良好な方がフィルタによる補償効果は大きく、また、SNRが40dB程度以上であれば、フィルタは雑音が無い理想的な状態と同程度の補償効果となることわかる。

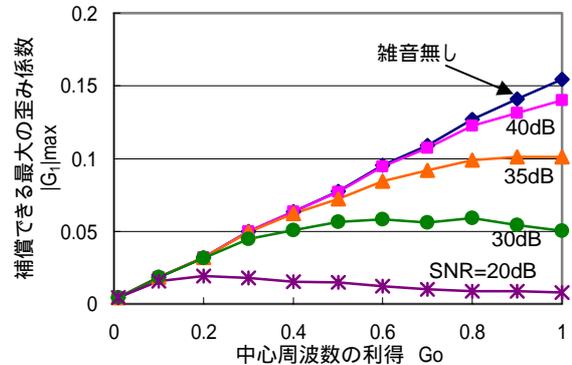


図8 中心周波数の利得と補償できる最大の歪み係数

図9にフィルタにより補償効果が得られる最大の歪み係数 $|G_1|_{max}$ を示す。縦軸を補償できる最大の歪み係数 $|G_1|_{max}$ 、横軸を入力信号のSNRとし、中心周波数の利得は1.0とした。図9より、フィルタはアンテナの周波数特性が一次歪みである場合に、一番大きな歪み係数まで対応できることがわかる。これは、アンテナの周波数特性歪みが二次歪み、もしくは三次歪みの場合、最低周波数 $f_L$ または最高周波数 $f_H$ 付近において急激に利得が変化しているためと考えられる。また、二次歪みの時、一次歪み、および三次歪みの場合より $|G_1|_{max}$ が小さくなった。これは、図7(a)に示したように、 $G_1$ が負である場合、2次歪みの周波数特性は中心周波数 $f_0$ より高い周波数と低い周波数の2箇所利得が大きく低下することにより、雑音の影響を受けやすくなるためと考えられる。

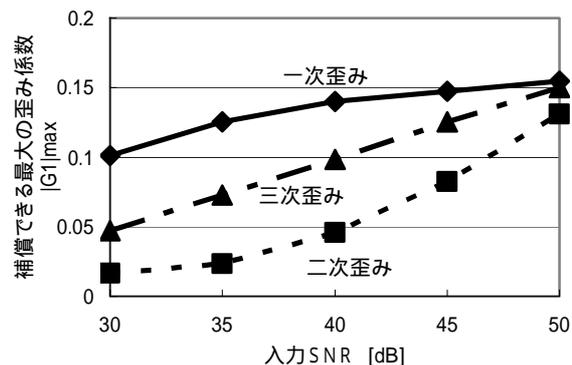


図9 入力SNRに対する補償できる最大の歪み係数

#### 4.4. タップ数が補償効果に及ぼす影響

次に、波形歪み補償効果に対するフィルタのタップ数の影響について検討した。アンテナの周波数特性を1次歪み、入力 SNR を 50dB とし、フィルタのタップ数を 64, 32, 22, および 16 とした時の、アンテナ利得の周波数特性の歪み係数  $G_1$  と MSE の比の関係を図 10 に示す。

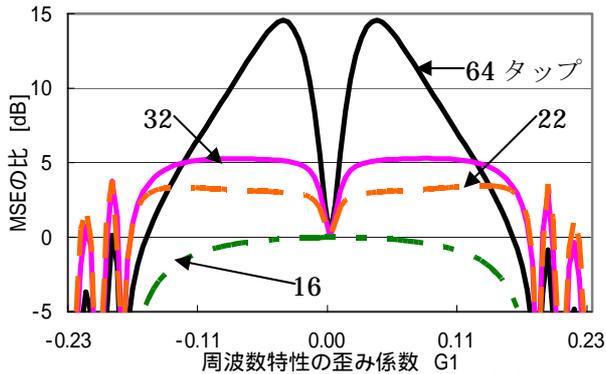


図10 タップ数による補償効果の変化

図 10 より、フィルタのタップ数を少なくすると、MSE の比の値が小さくなり、アンテナ送信パルス波形歪みの補償効果が低下すること、および、タップ数を 16 まで減らすと全く補償効果が得られなくなることがわかる。また、フィルタによる補償効果が得られる  $G_1$  の範囲に関しては、フィルタを 64 タップとするよりも 32 タップ、22 タップとした方が、若干大きな周波数特性歪みの場合まで補償効果を得ることができている。

#### 5. むすび

アンテナの周波数特性を考慮して入力信号を整形することで、本来送信したい波形を送信するためのフィルタを提案し、その補償効果について検討した。その結果、アンテナの周波数特性が一次歪み、二次歪み、および三次歪みのいずれの場合においても、提案フィルタにより、送信波形歪みを低減できることがわかった。また、周波数特性が 1 次歪みの場合、40dB の入力 SNR を確保することができれば、雑音が無い場合と同程度の補償効果を得ることがわかった。さらにフィルタのタップ数を 22 タップ以上とすれば、64 タップのフィルタと同様の補償範囲

を確保できることがわかった。一方、使用帯域内において利得が極端に小さくなる周波数が存在する場合、フィルタが逆効果となることがわかった。今後、更なる検討を進める。

#### 謝辞

本研究は財団法人国際コミュニケーション基金の研究助成を受け実施した。関係各位に感謝する。

#### 文 献

- [1] 小林岳彦, 幸谷智, “UWB ワイヤレスシステムの研究開発動向” 信学論 (A), vol.J86-A, no12, pp.1264-1273, 2003.12
- [2] 佐藤正和, ジュゼッペ アブレウ, 河野隆二, “UWB のための各要素アンテナから周波数分布が異なる信号を送信するビームフォーミング法” 信学論 (A), vol.J86-A, no12, pp.1302-1309, 2003.12
- [3] M.Z. Win and R.A. Scholtz, “Impulse Ratio: How it works” IEEE Commun. Mag., vol.2, no.2, pp.36-38, Feb. 1998
- [4] R. Kohno, H. Zhang, and H. Nagasaka, “Ultra wideband impulse radio using free-verse pulse waveform shaping, soft-spectrum adaptation and local sine template receiving” IEEE 802.15-03/097r1, March 2003.
- [5] 谷口慶治, “信号処理の基礎”, 共和出版 2001