

# UWB のための回路技術

## RF and High-Speed Circuits for Ultra-Wideband Technology

荒木 純道

東京工業大学 大学院理工学研究科 電気電子工学専攻  
独立行政法人通信総合研究所 UWB 結集型特別グループ

Kiyomichi Araki

Dept. of Electrical & Electronics Eng., Tokyo Institute of Technology,  
UWB Technology Institute, Communications Research Lab.

### Abstract

UWB requires a very wide band flat characteristics of RF circuits, e.g. Antennas, Filters, Multipliers, Amplifiers, etc. Also a large dynamic range operation is necessary for the pulse signal transmission. We here address a principle of UWB and these design issues for UWB transceivers.

### 1. はじめに

UWB (Ultra Wide Band) の名で呼ばれる広帯域無線情報伝送技術が近年注目を集めている。これは 2002 年 2 月に、アメリカの FCC (連邦通信委員会) が UWB 用として 3.1–10.6 [GHz] の周波数帯域を公衆通信に免許不要で開放したことが大きく影響している。[1]

勿論、これだけの広帯域であるから既存の通信・レーダシステムと競合することは避けられない。例えば、5GHz 帯の無線 LAN、IEEE802.11a が UWB の周波数競合システムとして直ちに思い浮かぶ。[3]

UWB と既存システムとの干渉問題 (与干渉、被干渉) はまだまだ議論の余地が残るが、FCC の考え方は基本的には UWB の電力密度を十分下げることによって干渉を抑圧し、UWB システムを既存システムに「オーバレイ」していくという方針である。具体的な電力密度としては  $-41.3$  [dBm/MHz]  $80$  [nW/MHz] という数値が示されている。もし 7500MHz の帯域幅を全て使うとしても  $600 \mu W$  という低送信電力になる。(なお、瞬時的な尖頭電力レベルとしては 0dBm/50MHz を許容)

さて UWB 技術の源泉を辿ると、Marconi のパルス無線通信にまで遡ることができ、1896 年彼によって英国特許が取られている。当時の通信装置は送信機として火花放電器とインダクタコイルの組み合わせを用い、導線 + パラポラ反射板をアンテナ、LC 同調回路を受信機にしている。しかし、より直接的な源泉は 1970 年代以降の軍事通信技術に、そのルーツを求めることができよう。

# その意味では無線通信における新たな展開技術としてのソフトウェア無線、アドホック無線も同様にそのルーツを軍事通信技術に辿ることができる。

UWB 技術の特徴の一つは、極めて低い周波数利用効率 (データ伝送速度 / 帯域幅) ということである。例えば、マイクロ波帯の UWB バンド、 $7.5 = 10.6 - 3.1$  [GHz] に対して、100Mbps の高速無線伝送を想定したとしても、その周波数利用効率は、僅か  $0.1/7.5 = 1.3\%$  に過ぎない。UWB は低い周波数利用効率を活用して、極低送信電力を実現しようとする。[1]

また、パルス伝送を基本とすることによって、デジタル通信に必要なデジタル回路機能を生かしつつ従来の狭帯域通信システムにおける RF 回路部品 (ミキサー、局部発振器、狭帯域フィルタなど) を削減し、簡便な送受信機構成を実現しようとするものである。

本稿では、まず UWB の基本原理を紹介し、続いて UWB 送信機、そして UWB 受信機構成について述べる。それらに付け加えて最近にな

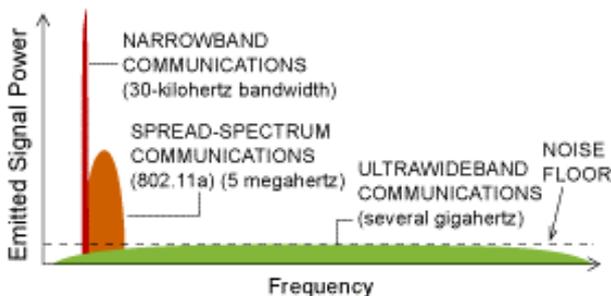


図 1 狭帯域通信と UWB 通信[15]

って活発に議論が展開されているマルチバンド UWB についても紹介する。そして今後 UWB 送受信機を設計していく上での留意事項について言及し、さらに予想される応用分野についても概観していく。

## 2. UWB の基本原理

最初に情報通信の基本的枠組みを理解するために通信路容量について復習しておく。これによって帯域幅  $B$  と送信電力  $S$  の関係を理解することができる。

### 2.1 UWB のための通信路容量計算

図 2 に示される送受信間の通信路の伝達係数を  $h$  とすると、通信路容量  $C$  [bps] (誤り無しで情報伝送できる伝送速度の上限) は

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S|h|^2}{N} \right) \quad (1)$$

$$= B \log_2 \left( 1 + \frac{S|h|^2}{N_0 B} \right)$$

で与えられる。[2]

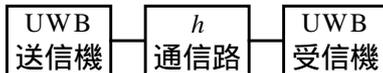


図 2 通信モデル

但し、 $S$ :送信電力でありその電力密度は帯域内で平坦であると仮定している。また  $N$ :受信機での雑音電力で、 $N_0$ :同じくその雑音電力密度である。なお  $S|h|^2$  は受信電力。

#### [ 数値例 1 ]

100Mbps のデータ伝送速度を実現するためには

1.  $B = 7.5 \text{ GHz}$  の場合、受信 SNR は  $-20\text{dB}$
2.  $B = 100 \text{ MHz}$  の場合、受信 SNR は  $0\text{dB}$  が最低限必要である。

#### [ 数値例 2 ]

さらに通信品質としてビット誤り率  $P_e = 10^{-3}$  を要求してみると、必要な受信  $E_b/N_0$  は

$$E_b/N_0 = 6.2$$

となるので [12] 必要な受信 SNR は夫々

1.  $B=7.5\text{GHz}$  の場合、 $-10.8\text{dB}$
2.  $B=100\text{MHz}$  の場合、 $7.9\text{dB}$

となる。

但し、 $E_b$ :1 ビット当たりの受信エネルギーであり、通信路の Fading 変動はないものと想定している。

# Rayleigh Fading 環境 (見通し外環境) では

$$E_b/N_0 = 499$$

となり、受信 SNR はさらに  $19\text{dB}$  必要となる。

なお、ここで言っている通信路は「送受信アンテナ + 伝播路」を指していて、その周波数特性はないものとしている。(図 3) 即ち、マルチパス遅延は無視しているし、アンテナ特性は十分広帯域であると仮定している。このことは実際の無線通信環境 (例えば、室内環境) に UWB を適用する際、そしてアンテナを設計する際には注意が必要である。また雑音は白色雑音と仮定している。さらに実際の環境では周波数特性を有する狭帯域干渉波が存在する。このことも UWB を実用化していく上で欠かせない検討事項である。[3]

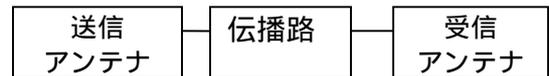


図 3 通信路

また送受信アンテナは確定した特性であるが、無線通信の宿命として伝播路の特性には Fading など確率的な変動要因が入って来る。短距離室内通信 (WPAN) を見通し内環境 (LOS) で実現するのであれば、Rice 係数の高い Rice 環境とも考えられる。いずれにしろ、短距離室内環境の時空間特性の統計的挙動を正確に見積もることが UWB システム設計上重要である。[13]

### 2.1.1 通信容量の上限

周波数帯域が十分与えられているのが UWB の特長ではあるが、送信電力  $S$ 、雑音電力密度  $N_0$ 、伝達係数  $|h|$  が一定であるとする (1) 式より  $C$  は帯域幅  $B$  に関して単調増加関数であっても、その上限が存在し

$$C_u = \frac{S|h|^2}{N_0 \log_e 2} \quad (2)$$

となる。但し、 $\log_e 2 = 0.693$

送信電力  $S$  として、FCC 規格の最大値である ( $-41.3\text{dBm} \times 7500 = 0.55\text{mW}$ ) を想定し、 $N_0$  として白色熱雑音源  $kT$ , ( $k$ : Boltzman 定数、 $T$ : 雑音温度、 $300\text{K}$ ) とすると

$$N_0 = 1.38 \times 10^{-23} \times 300 = 4.14 \times 10^{-21}$$

となるので

$$C_u / |h|^2 = 1.94 \times 10^{17} \quad (3)$$

となる。

# ちなみに  $-41.3\text{dBm}/\text{MHz}$  の電力密度を等価白色雑音温度で表現すると

$$T = 5.4 \times 10^9 \quad [\text{K}]$$

となる!

### 2.1.2 Friis の伝達公式

さらに  $|h|$  の概略値を Friis の伝達公式から見積もってみる。[4]

$$\begin{aligned} |h|^2 &= (\lambda/4\pi d)^2 \times G_t \times G_r \\ &= A_t \times A_r / (\lambda d)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

但し、 $\lambda$ : 波長、 $d$ : 送受信アンテナ間の距離、 $G_t$ : 送信アンテナ利得、 $G_r$ : 受信アンテナ利得、 $A_t$ : 送信アンテナ有効面積、 $A_r$ : 受信アンテナ有効面積である。

#### [ 数値例 3 ]

一般にアンテナ利得は周波数特性を持つし、Friis 公式自体にも周波数依存性があるが、取り敢えず中心周波数  $f_c = 6.5\text{GHz}$  で見積もってみる。 $\lambda = 4.6\text{cm}$ 、 $d = 10\text{m}$  (典型的な室内環境)、 $G_t = G_r = 0\text{dB}$  とすると

$$|h|^2 = 1.34 \times 10^{-7}$$

となる。(68.7dB の減衰量)

# なお Friis 公式自体は狭帯域通信の電力伝達係数のみを述べているが、パルス波形伝送を問題にするのであれば、その位相特性(群遅延特性)にも注意を払う必要がある。この事は後で検討する。[5]

図4はUWB用に開発された小型アンテナの測定結果の1例である。(  $|h| = |S_{21}|$  ) この場合、送受信アンテナ間の距離が75cmであるので  $d = 10\text{m}$  とすると Friis 公式によれば、更に 22.5dB ほどの減衰増加が見込まれ 70dB 超の減衰量となり先ほどの概略値は妥当な値と考えられる。

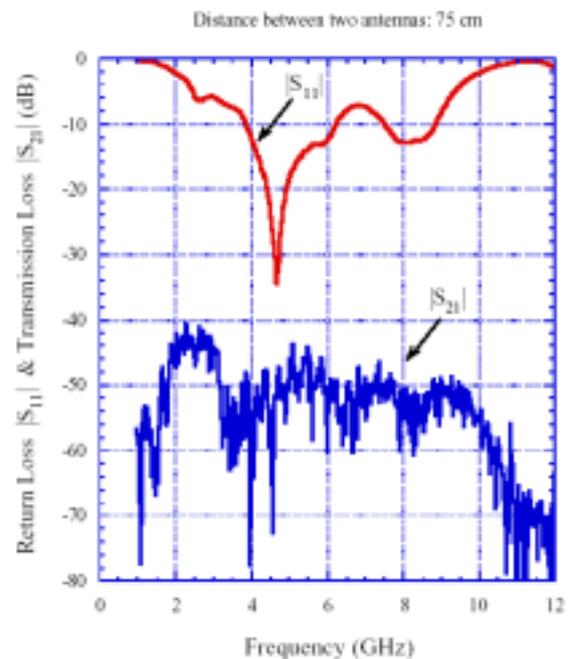


図4 小型UWBアンテナ[11][16]

結局、通信路容量の上限値はこの場合(3)より

$$C_u = 2.6 \times 10^4 \quad [\text{Mbps}]$$

となる。

一方、 $B = 7.5\text{GHz}$  の場合でも(1)より

$$C = 1.3 \times 10^4 \quad [\text{Mbps}]$$

となる。

FCC 規格の最大値である  $0.55\text{mW}$  の送信電力、 $d = 10\text{m}$  程度の短距離を想定すれば、受信 SNR は 3.8dB となり、[数値例2]が要求している受信 SNR = -10.8dB を大幅に上回っていることになる。こうして短距離通信における 100Mbps の高速伝送の可能性は十分示されたことになる。

# 但し、所望受信 SNR の計算においては伝播路の Fading は一切考慮されていないことに注意。もし Rayleigh Fading 環境を仮定すると所望受信 SNR は 8.2dB となり、3.8dB を上回り、ビット誤り率  $P_e = 10^{-3}$  の通信品質は満足できなくなる。実際の室内通信環境は AWGN 環境と Rayleigh Fading 環境の中間の仲上・Rice 環境にあると思われる。

以上の議論から実装上の問題点も浮かび上がってくる。即ち、伝送時におけるパルス波形の遅延・歪み特性である。

理想的には「アンテナ + 伝播路」の特性は定振幅、定遅延特性であることが望ましいのであるが、実際にはそうした特性は期待できない。[ 14 ] またマルチパス遅延波の処理問題も残されている。

## 2.2 UWB の伝送技術

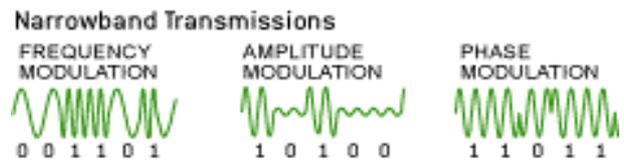
通信路容量はあくまでも伝送速度の理論限界であり、実装に当たっては検討すべき課題が幾つか残されている。その中で主要なものが変調、復調技術である。そのほかにも、同期技術、等化技術も重要である。

### 2.2.1 変調技術

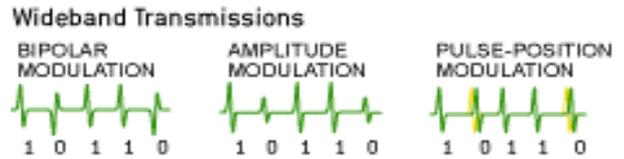
パルス波形を用いたデジタル伝送を念頭におくと以下の変調復調の手順が考えられる。

- 1 . PAM ( Pulse Amplitude Modulation )  
パルスの波高値に情報を乗せる。
- 2 . PPM ( Pulse Position Modulation )  
パルスの位置に情報を乗せる。
- 3 . Bi-phase Modulation  
パルス振幅が正か負かで 2 値情報を乗せる。
- 4 . OOK ( ON/OFF Keying )  
パルスのある、無しで 2 値情報を乗せる。

それらの概念説明図を図 5 に示す。



(a) 狭帯域通信の変調



(b) 広帯域通信の変調

図 5 各種の変調方式

基本パルス波形は時間的に狭ければ、そのスペクトルは広くなるのは言うまでもない。

[ 数値例 3 ]

パルス幅：200ps      スペクトル幅：約 5GHz

### 2.2.2 拡散技術

実際にデジタル情報を伝送する際には基本パルス波形にさらに拡散技術が施される。

- 1 . TD ( Time Modulation )
- 2 . DS ( Direct Sequence )

CDMA と同様に拡散されたパルス波形列に対しては、逆拡散操作が受信機で行われ、拡散利得が得られる。

# n 倍の拡散率によって、n 倍の受信 SNR 改善が得られる。

# n = 24 程度がよく検討されている。[ 6 ]

さらに拡散系列に直交性が成立すると、Rake 受信が可能となる。[ 13 ] 即ち、遅延波のエネルギーを干渉要因と捉えるのではなく受信信号の SNR 改善に役立てることができるようになる。

# 時間軸上の窓関数処理を施して、遅延波成分を抑圧することも考えられる。

[ 数値例 4 ]

データ伝送速度：100Mbps で、2 値変調を想定すると 1 ビットの区間長：10ns となり d = 10m 程度の室内環境における遅延時間広がり

を 3.3ns(1m の伝播距離差に相当)と見なす。拡散率  $n = 8$  で基本パルス幅を 200ps とするとパルス系列の時間長 =  $200\text{ps} \times 8 = 1.6\text{ns}$  となる。そこで十分な同期が確立していれば、2ns 程度の時間幅の窓関数処理で遅延波は抑圧されることになる。

しかし 500Mbps 以上の伝送速度を実現しようとすると、1 シンボル時間以上の遅延が発生することは避けがたく、単純な時間軸上の窓関数処理では対応しきれなくなると予想される。

### 2.2.3 復調方式

UWB のデジタルパルス通信においては、拡散系列も基本パルス波形も固定されているので、もし送信パルス波形が歪み無く受信機に到達したとするとデジタル情報を誤り最小で復元する手順はマッチドフィルタを用いることになる。[7]

即ち、受信機では受信信号波形と送信パルス波形と相似な波形との相関演算が必要となる。基本的にはこの信号処理は 2 信号の乗算と乗算結果の積分ということになる。

高速アナログ乗算回路としては、Gilbert Cell 構成の回路がしばしば検討されている。[19] 但し、短パルスの乗算を行う必要から動作遮断周波数の十分高いデバイスが要求されている。そこで高速動作可能な SiGe デバイスなどが有望視されている。SiGe HBT の動作周波数は数 10GHz を超える。[20]しかし、デジタル回路との一体化という意味からすると RF-CMOS への期待は高い。最終的には乗算結果の時間積分値でデジタル情報の検出判定をコンパレータによって用いて行う。

### 2.2.4 マルチバンド UWB

マイクロ波帯における 7.5GHz もの広帯域をそのまま使用するのではなく、528MHz のサブバンドに分割して使用する方式が最近になって Intel を中心に提案されている。[8] 計 14 個のサブバンドは 4 個のグループにまとめられている。

1. Group A: Intended for 1<sup>st</sup> generation devices (3.1-4.9GHz)
2. Group B: Reserved for future use (4.9-6.0GHz)
3. Group C: Intended for devices with improved SOP performance (6.0-8.1GHz)

### 4. Group D: Reserved for future use (8.1-10.6GHz)

この場合各サブバンドでは OFDM 変調が想定されている。さらにサブバンド間を周波数ホッピングしながら複数ユーザが同時にデータ伝送を行うとしている。こうした方式を実現するために送受信機では、高速周波数切り替え PLL が必要になってくる。

この通信方式は、従来の狭帯域通信方式と大きな差異がなく、回路構成は複雑になるくらいが懸念される。

### 2.4 UWB 送受信機の回路要素

UWB 送受信機を構成する上で欠かせない回路要素について検討する

#### 2.4.1 広帯域バンドパスフィルタ

図 6 に示す FCC のスペクトルマスクを満足させるためには広帯域バンドパスフィルタが必要になってくる。

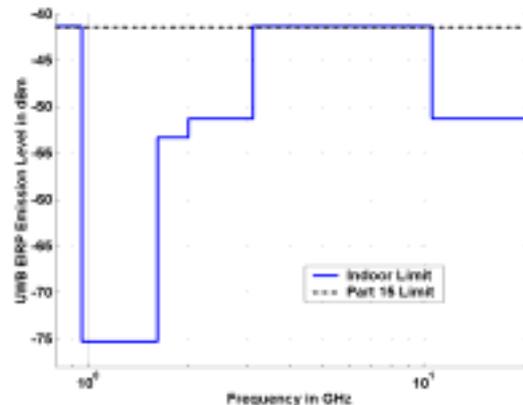


図 6 FCC スペクトルマスク[15]

帯域外抑圧レベルとしては 10dB 程度、特に GPS バンドに対しては 35dB が必要である。但し、日本では GPS 応用は車載機が大部分であるので室内通信(WPAN)を念頭においている UWB との干渉問題はあまり問題にならないことも考えられる。

さて図 7 に最近開発されたリングフィルタを用いた広帯域 BPF の実物写真を示す。リング部、スタップ部の特性インピーダンスを制御することによって、所望の周波数に減衰極を設定し、通過帯域内で 0.5dB 程度の挿入損失、0.6ns の群遅延特性を得ている。(図 8)[9] 多層構造化するなどしてさらなる小型化をはか

る必要があろう。

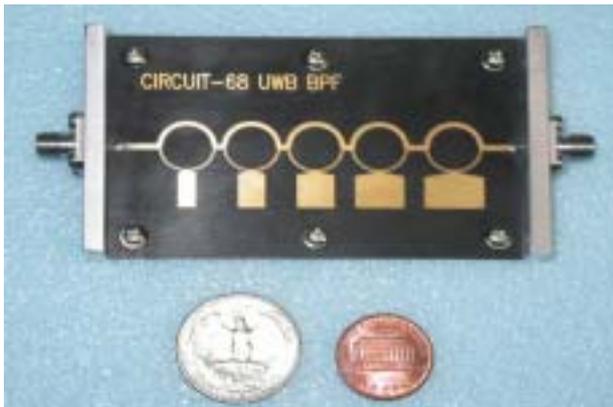
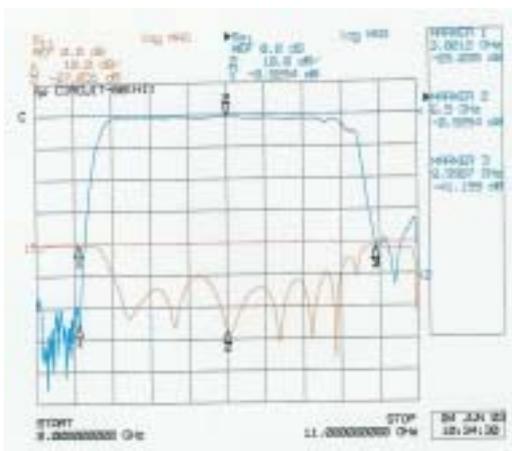
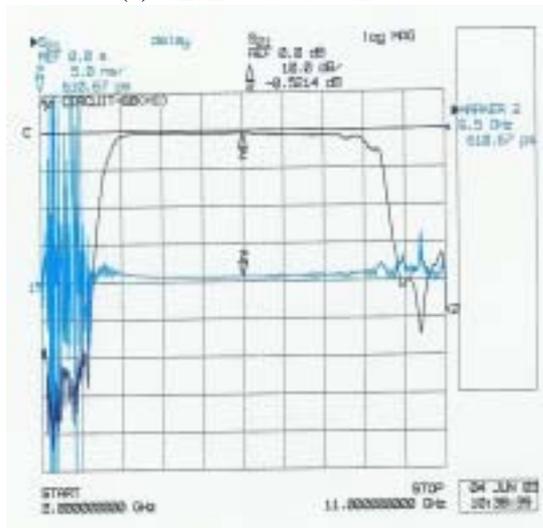


図7 リングフィルタを用いた広帯域 BPF



(a) 通過・反射特性



(b) 遅延特性

図8 リングフィルタの周波数特性

## 2.4.2 広帯域アンテナ

UWB 用の広帯域アンテナが幾つか開発されている。基本的には指向性利得は犠牲にして広帯域特性を得ようとするものが多い。ダイ

ポールアンテナの変形、磁流アンテナ、メアンダーライン構造アンテナなどが提案されている。[10][16][17][18]

得られたアンテナ指向性は一般に広角である。しかし、遅延波対策の観点から今後狭角指向性の受信アンテナが要求されるようになるかもしれない。

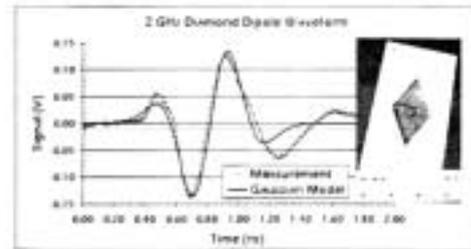


図9 ダイヤモンド ダイポールアンテナ[10]

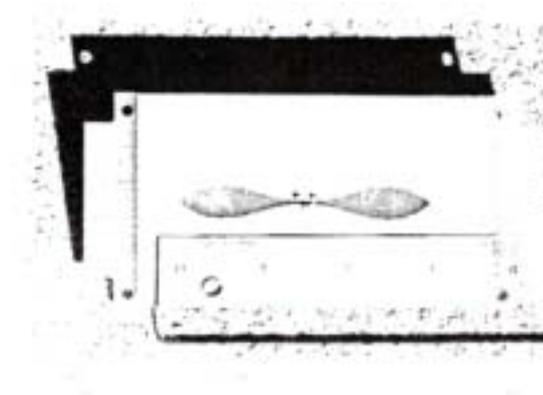


図10 COTAB スロットアンテナ[17]

またアンテナ自身の群遅延特性に関する詳細な検討は、今後の課題の一つであろう。

## 2.4.3 高速乗算器

UWB 受信機においては、マッチドフィルタ処理もしくは相関演算が必要となる。つまり、受信パルス信号と予め用意された基準のテンプレートパルス波形との乗算が必要であり、この信号処理は現在の DSP 能力からすると AD 変換してからデジタル信号処理として行う訳にはいかない。そのため高速アナログ乗算器が不可欠となってくる。但し、この処理は送信機では必要ない。

なお極低送信電力を目標にしている UWB では受信レベルも十分低いと予想されるので、乗算器の非線形性が問題になることは少ないであろう。それよりも高速応答性、(広帯域性)が重要である。

[数値例 5]

さて受信パルスの振幅レベルを見積もってみ

る。送信電力を  $600 \mu\text{W}$ 、送受信間の減衰量を  $70\text{dB}$ 、パルスデュ-ティ比  $1.6/10$ 、 $50$  終端とすると電圧レベル  $V_{p-p}$  は  $0.4\text{mV}$  程度と見積もられる。

#### 2.4.4 パルスジェネレータ

短パルス（数  $100\text{ps}$  程度以下）の発生は SRD(Step Recovery Diode)などを用いて行われている。パルス波形の整形についての検討がさらに必要である。

#### 2.4.5 LNA

所望 SNR レベルが十分低いので、簡便な受信機構成を目指すのであれば、受信機初段の LNA はなくてもいいとも考えられる。LNA や AGC の必要性は、主として伝播路の Fading 特性に依存している。

### 3. UWB 送受信機の構成

以上のことをまとめると図 1.1, 1.2 のようになる。[6]

送信機に比べて受信機の構成が複雑になっていることに気が付く。なお、通信路の周波数特性によって受信パルス波形に歪みが生じた場合には、受信機内のテンプレートパルス波形をその歪みに応じて修正する必要がある。

図 3 に示したように通信路は送受信アンテナと伝播路からなっているので、特性が確定している送受信アンテナの周波数特性を予め考慮してテンプレートパルス波形を準備しておくことは可能であろう。しかし伝播路の特性は Fading 変動が大ききときには、適応的にパルス波形の修正をしなければならない。もしそうした適応処理をしないのであれば、受信パルス波形の歪みにより、相関演算後の SNR は劣化する。これらの見積もりは今後の課題の一つである。

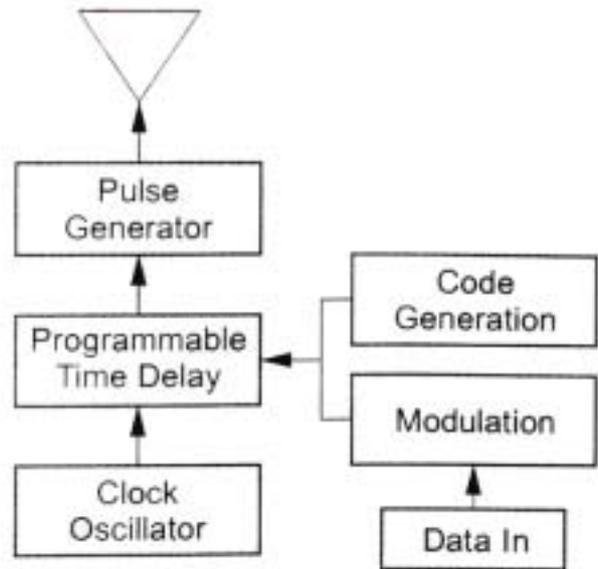


図 1.1 UWB 送信機構成

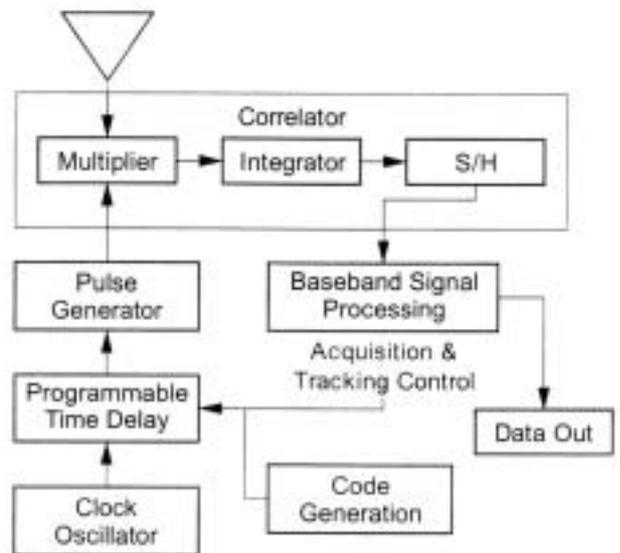


図 1.2 UWB 受信機構成

### 4. UWB システム

広帯域スペクトルを活用した応用システムには次のようなものがある。

1. Imaging Systems
2. Vehicular Radar Systems
3. Communication Systems

#### 4.1 短距離通信

短距離であれば低送信電力で高速データ伝送が可能になるという特長を生かして図 1.3 の WPAN(Wireless Personal Area Network)が大いに注目されている。情報家電の一つの形態とも考えられている。

勿論屋外通信への応用も考えられているが、伝播損の増加だけでなく多数の狭帯域干渉信号の除去抑圧など解決すべき課題は多い。

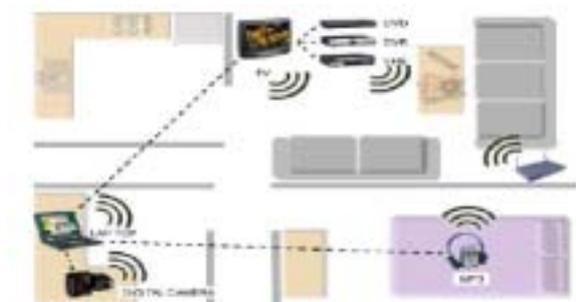


図 1 3 ホームネットワーク[6]

#### 4 . 2 センシング、イメージング

やはり UWB の広帯域性を生かしたセンシング、イメージングには以下の例が考えられている。[15]

- 1 . Ground Penetrating Radars
- 2 . Wall Imaging
- 3 . Vehicular Radar
- 4 . Identification Tags
- 5 . Location Tracking
- 6 . Security Systems

例えば、自動車レーダでは測距精度の向上、目標物の検出見逃し確率の低下などに期待が寄せられている。また RF Tag への応用は送信機の簡便性を生かそうとするものである。

#### 5 . まとめ

ここでは UWB 通信の原理と技術課題を概観した。極低送信電力で高速データ無線伝送が実現できることに意義は大きい。「帯域は財産なり」という言葉があるが、UWB の特長はこの広帯域性という財産を有効活用することにある。短距離伝送でしかもモビリティを犠牲すればこうした事が可能になりそうである。

#### 参考文献

- [1] Federal Communication Commission, First Report and Order, FCC02. V48, Apr. 2002
- [2] J. G. Proakis, “ Digital Communications,” (4<sup>th</sup> Edition), McGraw-Hill, 2001
- [3] 小野隆志、菅原弘人、渡邊吉則、岡ノ上和広、山崎太郎、“ RADIOSCAPE-UWB(4) - UWB 信号と狭帯域信号との干渉評価”, 2003

年電子情報通信学会ソ大、B-5-220, Sept. 2003/10/10

[4] 稲垣直樹、“電気電子学生のための電磁波工学”, 丸善、1980

[5] J.Takada, S.Promwong and W.Hachitani, “Extension of Friis’ Transmission Formula for Ultra-Wideband Systems,” IEICE Tech. Rep., WBS2003-8/MW2003-20, May 2003

[6] <http://www.xtremespectrum.com/>

[7] S. Haykin, “Communication Systems”, (4<sup>th</sup> Edition), John Wiley, 2001

[8] <http://www.ieee802.org/15/pub/TGa.html>

[9] 石田等、荒木純道、“リングフィルタによる UWB BPF の開発”, 信学技報、MW2003-159, Sept. 2003

[10] H. G. Schantz, and L. Fullerton, “The Diamond Dipole: A Gaussian Impulse Antennas,” 2001 IEEE APS Int. Symp. Vol.4 pp.100-103, July 2001

[11] 李可人、湯建輝、松井敏明、“UWB アンテナ特性の周波数領域・時間領域測定”, 2003 年電子情報通信学会、ソ大、SA-3-9, Sept.2003

[12] 齊藤洋一、“デジタル無線通信の変復調”, 電子情報通信学会、1996

[13] A. Molish, M. Winn, and D.Cassoli, “The ultra-wide bandwidth,”

IEEE P802.15-02/284-SG3a and  
IEEE P802.15-02/285-SG3a

[14] J.R. Forester, “The performance of a direct-sequence spread ultra-wideband system in the presence of multipath, narrowband interference, and multiuser interference,” Proc. IEEE Conf. on Ultra Wideband Systems and Technologies, pp.87-91, May 2002.

[15] M. J. Marcus, “New FCC Rules for UltraWideband (UWB) Systems,” TSMMW, YRP, Oct.2002

[16] <http://www.skycross.com/pdf/SMT3TO10MA.pdf>

[17] H. G. Schanz, M. Barnes, “The COTAB Magnetic Slot Antenna,” 2001 IEEE APS Int. Symp., Vol.4, pp.104-107, July 2001

[18] T. Taniguchi and T. Kobayashi, “ An omnidirectional and low -VSWR antenna for the FCC-approved UWB frequency band,” IEEE APS Int. Symp. vol.3, pp.460-463, June 2003

[19] P.J.Sullivan, B.A. Xavier and W.H. Ku, “Low Voltage Performance of a Microwave CMOS Gilbert Cell Mixer”, IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.32, no.7, pp1151-1155, July 1997

[20] Y.Itoh and K.Honjo, “Fundamental Perspective of Future High Power Device and Amplifiers for Wireless Communication Systems”, IEICE Trans. Electron., vol.E86-C, No.2, pp.108-119, Feb. 2003