

ストアドチャンネルを用いた UWB 伝送特性評価の有効性検証

ヒュン ティ タン チュウ, 羽田 勝之 (東京工業大学), 滝沢 賢一 (情報通信研究機構), 高田 潤一 (東京工業大学)

Validating the effectiveness of UWB transmission simulation using a stored channel
 Huynh Thi Thanh Trieu, Katsuyuki Haneda (Tokyo Institute of Technology)
 Ken-ichi Takizawa (National Institute of Information and Communication Technology)
 Jun-ichi Takada (Tokyo Institute of Technology)

Abstract

In order to evaluate Ultrawideband (UWB) communication systems under realistic propagation environments, it is effective to use stored channels in computer simulations. The stored channels are experimentally measured impulse response (or equivalently transfer function) in channel sounding campaigns. This study investigates the effectiveness of stored channel simulations for evaluating UWB system performances. By comparing the experimentally measured receiving waveform using UWB transmission testbed and the waveform obtained from stored channel simulations, we assessed the similarity of the simulated result and experimental result.

キーワード：UWB 通信, UWB 伝搬, スタドチャンネル
 (UWB communications, UWB propagation, stored channels)

1. はじめに

超広帯域無線 (Ultra wideband radio: UWB radio) における伝送特性を評価するために, IEEE802.15.3a と IEEE802.15.4a で標準チャンネルモデルが策定され, 広く使われている⁽¹⁾⁽²⁾. しかし, これら標準モデルは, 伝送特性の優劣の評価を行う上では有用であるが, 特定の環境における伝送特性の評価には向いていない. これは, 標準チャンネルモデルが確率的な生成法に基づいており, 特定の環境における物理現象を考慮することが難しいためである. これに対して, 実環境において実験的に電波伝搬路応答を測定し, それらを用いて伝送特性を評価する方法はストアドチャンネルシミュレーションと呼ばれており, 特定の環境における UWB 方式の有効性を検証する上で非常に有効である. 現在までストアドチャンネルシミュレーションに関する報告がいくつかなされているが⁽³⁾⁽⁴⁾, このシミュレーションが実機の伝送特性を正確に模擬できるかどうかの検証はまだ行われていない. そこで本稿では, 独立行政法人情報通信研究機構の開発した UWB 方式評価用テストベッド (以降, 本稿では「UWB テストベッド」と呼ぶ)⁽⁵⁾ を使用して測定した受信波形と, スタドチャンネルを用いて評価した受信波形と比較し, 両者がどの程度一致するかについて検討する. この結果は, UWB 無線機器の設計やその実環境における性能評価, そして伝送システムのプロトタイプ作成にかかるコスト削減など, リンクレベルのシステム設計に大きな貢献となる.

本稿では最初に, UWB テストベッドの構成および送信波形の作成方法を述べ, その後, 実験方法では, 受信波形の測定方法, シミュレーション方法について詳細に述べる.

最後に, それぞれの方法で得た結果を示し, 考察を行う.

2. UWB テストベッドの構成

図 1 に UWB テストベッドの送受信機の概観を示す. また, 図 2 はテストベッドの詳細の構成図を図示したものである.

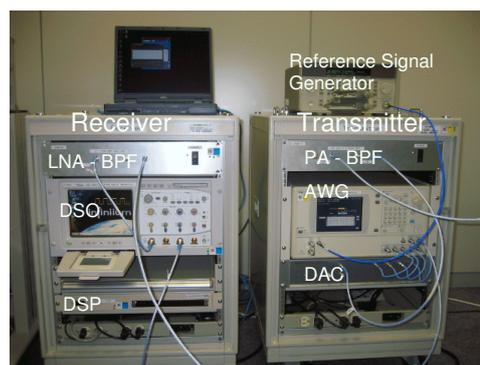


図 1 UWB テストベッドの送受信機概観

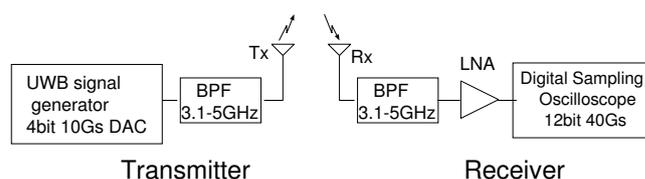


図 2 UWB テストベッドの送受信機構成

UWB 送信部は、任意波形発生器 (AWG) と 10 Gsps, 4 ビットの DA コンバータ, そして RF フロントエンドから構成されている。DA コンバータを通して, 5 GHz までの信号を AWG より直接生成できる。発生させた信号は, 3.1-5 GHz のバンドパスフィルタ (BPF) を通ってアンテナに送られる。

一方, UWB 受信部では, アンテナからの信号は通過帯域幅が 3.1-5 GHz の BPF と利得が約 20 dB の低雑音増幅器 (LNA) を通過した後に, 40 Gsps, 12 ビットのデジタルサンプリングオシロスコープ (DSO) で検出される。

また, 送信部の AWG と受信部の DSO の同期をとるために 10 MHz の基準信号発生器を用いる。基準信号発生器は DSO 用の基準信号および任意波形発生器用のクロック同期信号を発生することができる。

3. 送信波形作成

本実験では Root-Raised Cosine (RRC) フィルタのインパルス応答を周波数 f_c の正弦波で変調したパルス信号の波形を送信信号とする。その波形は以下の式で表される⁽⁵⁾。

$$p(t) = \frac{\cos \frac{(1+\alpha)\pi t}{\tau} + \frac{\tau}{4\alpha t} \sin \pi \frac{(1-\alpha)t}{\tau}}{1 - \left(\frac{\alpha t}{\tau}\right)^2} \cos 2\pi f_c t \quad (1)$$

ここで, τ は時間幅を決めるパラメータで, α はロールオフファクタである。波形の設定において, $\alpha = 0.35$, $\tau = 0.75$ ns, パルス幅 $T_d = 4.8$ ns とした。このパルス信号の周波数スペクトルは次式で与えられる。

$$|P(f)| = \begin{cases} 1 & |f - f_c| \leq (1 - \alpha)\omega_c \\ 0 & |f - f_c| \geq (1 + \alpha)\omega_c \\ \sqrt{\frac{1 + \cos \frac{\pi(\omega - \omega_c(1-\alpha))}{2\alpha\omega_c}}{2}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

RRC パルスの時間波形と周波数スペクトルをそれぞれ図 3 と図 4 に示す。

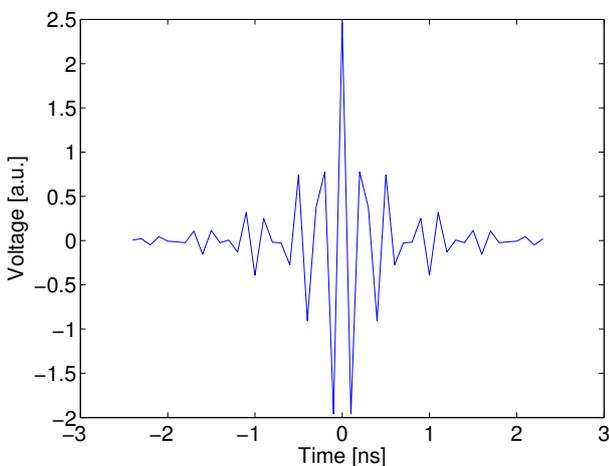


図 3 RRC パルスの時間波形

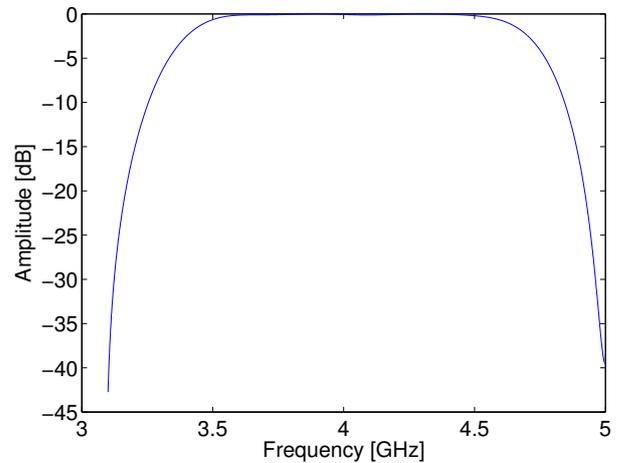


図 4 RRC パルスの周波数スペクトル

本実験では, 送信アンテナ直下における波形を RRC パルスとするため, 任意波形発生器に入力する波形データは BPF における波形歪みを考慮したものである必要がある。このため, 図 5 のプロセスで任意波形発生器に入力する波形データを設計した。

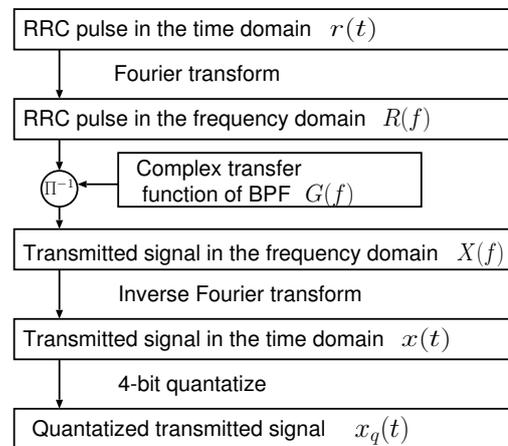


図 5 送信波形設計の流れ図

RRC パルスの時間信号を $r(t)$ とし, この信号を式 (3) に示した離散フーリエ変換したものは周波数軸上の信号 $R(f)$ となる。

$$R(f_k) = \sum_{n=0}^{N-1} r(t_n) e^{-j2\pi t_n f_k} \dots \dots \dots (3)$$

ここで N は時間軸上におけるサンプル数である。本設計では, 0.1 ns 間隔でサンプル点を取得しているので, $N = 49$ となっている。このとき, ベクトルネットワークアナライザ (VNA) で測定した送信部の BPF の特性を $G(f)$ とすると, この特性を除いた送信すべき周波数信号 $X(f)$ は

$$X(f_k) = \frac{R(f_k)}{G(f_k)} \dots \dots \dots (4)$$

となる．この周波数信号 $X(f_k)$ を式 (5) で逆離散フーリエ変換することによって，AWG に入力する送信信号 $x(t_n)$ を求めることができる．

$$x(t_n) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} X(f_k) e^{j2\pi f_k t_n} \dots \dots \dots (5)$$

ただし K は周波数軸上のデータサンプル数である．このようにして設計した波形データは任意波形発生器に 4 ビットの量子化をして入力する．図 6 と図 7 に，任意波形発生器の実際の出力信号 $x'(t)$ とそのスペクトル $X'(f)$ を示す．

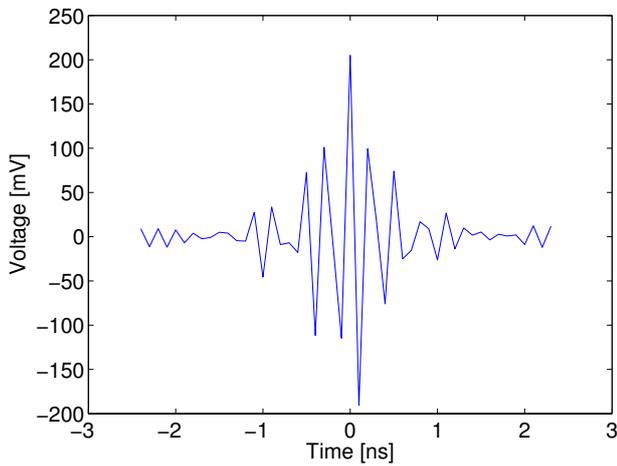


図 6 任意波形発生器からの実際の送信波形

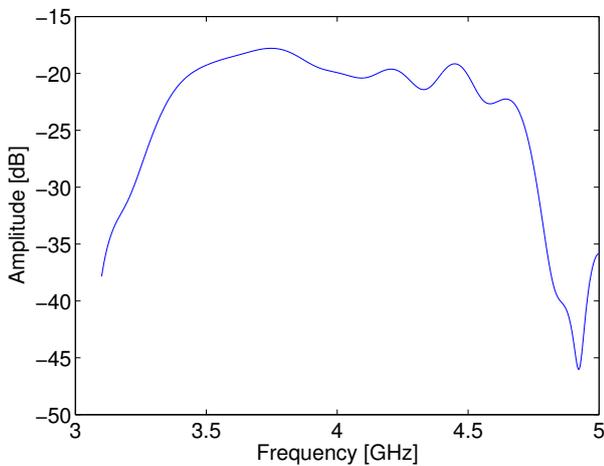


図 7 任意波形発生器からの実際の送信信号スペクトル

4. 実験方法

第 2 節で紹介した UWB テストベッドと第 3 節で設計した波形を用いた伝送・伝搬実験を行った．実際の測定環境を図 8 に，フロアプランを図 9 に示す．送受信アンテナの周辺にはドア，機器，机等の散乱物が多く存在している．



図 8 実験環境

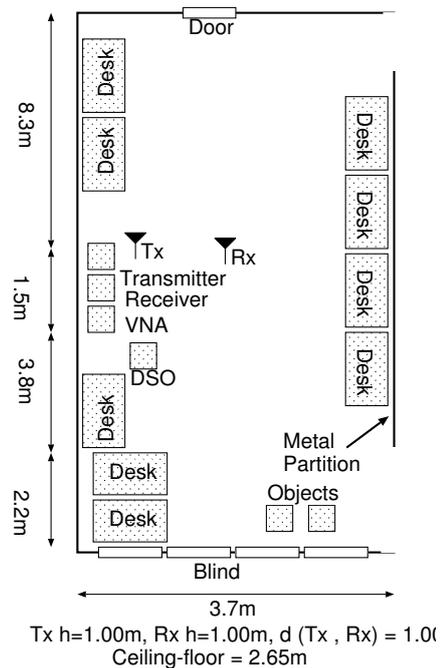


図 9 実験環境のフロアプラン

4.1 伝送実験 伝送実験における実験パラメタを以下に示す．

- 送信信号のパルスくり返し周期： $T = 64 \text{ ns}$
- 送信信号のピーク電圧： $V = \text{約 } 200 \text{ mV}$
- 送受信アンテナ：共に UWB 用モノポールアンテナ⁽⁶⁾
- 送受信距離： $d(Rx, Tx) = 1 \text{ m}$
- 送受信アンテナの高さ： $h(Rx) = h(Tx) = 1 \text{ m}$

伝送実験において DSO で観測された受信波形の一部を図 10 に示す．受信信号は受信機雑音と同じレベルもしくはそれ以下となっており，受信信号波形そのものを観測することは難しい．

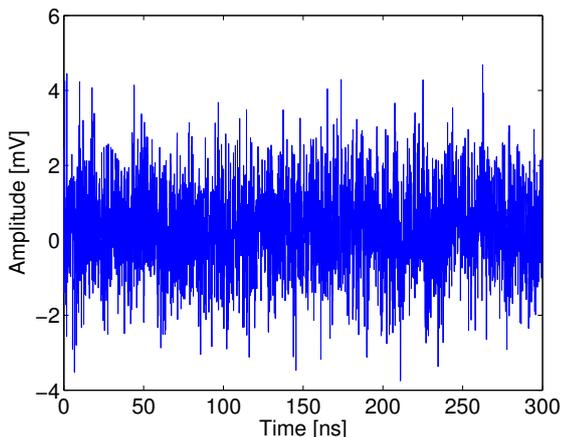


図 10 受信波形の一部

4.2 測定した受信波形の平均化 本実験では UWB 信号の送信電力が小さく，わずか 1 m 離れただけでも図 10 のように信号波形が雑音で大幅に歪んでいる．従って，信号成分を抽出するため，平均化処理により雑音の影響を小さくする必要がある．一般に， N 回平均化をすると信号対雑音比 (SNR) は約 $10 \log_{10} N$ dB 向上する．本実験では， $N = 780$ 回の平均化を行ったため，理論上で SNR が約 29 dB 改善されると期待される．平均化処理を行った後の受信波形を図 11 に示す．

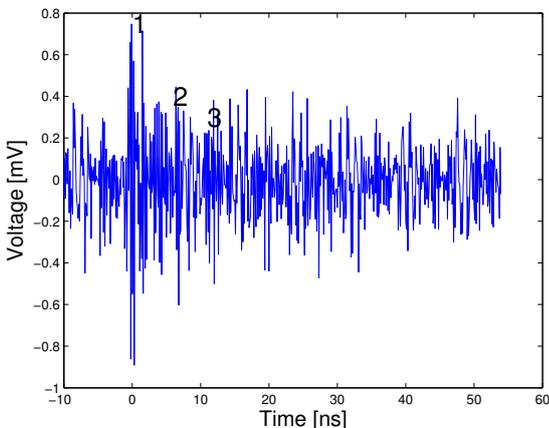


図 11 平均化した受信波形

4.3 伝搬実験 一方，受信波形の再現シミュレーションを行うために，ネットワークアナライザ (VNA) を用

いて，伝送実験と同じアンテナ位置における電波伝搬路の伝達関数を測定した．VNA の設定は，以下のようにした．

- 周波数：3.1 GHz から 5.0 GHz
- 周波数サンプル間隔：1.0 MHz (測定点数 1901 点)
- 送信電力：-17 dBm (正弦波)
- アベレージング：10 回

実験的に測定した伝搬路応答，つまりストアドチャンネルと送信波形を用いると，シミュレーションで受信波形の再構成を行うことができる．

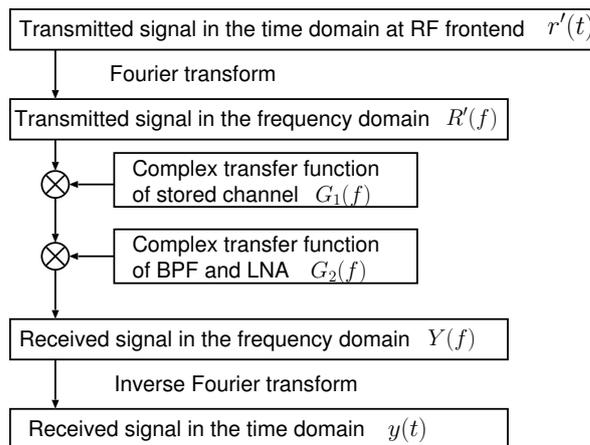


図 12 受信波形再構成の流れ図

4.4 受信波形再構成 最後に，ストアドチャンネルと送信信号を用いて，受信信号波形を再構成する方法を述べる．図 12 に受信波形を再現するための流れ図を示す．受信波形スペクトルは次式で表される．

$$Y(f_k) = R'(f_k)G_1(f_k)G_2(f_k)\dots\dots\dots (6)$$

ただし， $R'(f_k)$ ， $G_1(f_k)$ ， $G_2(f_k)$ はそれぞれ周波数 f_k における送信アンテナ直下の RRC 送信信号スペクトル，無線伝搬路の伝達関数，そして受信機 RF フロントエンドの伝達関数である．アンテナ直下における送信時間波形 $r'(t)$ を図 13 に示す．この送信信号に対して受信時間波形は図 14 のように求まった．

5. 結果・考察

本節では，伝送実験で得た平均化後の受信波形 (図 11) とシミュレーションで再構成した受信波形 (図 14) について比較を行い，ストアドチャンネルを用いたシミュレーションの有効性を確認する．

両方の波形を比較すると，直接波に対してほぼ同じ相対遅延時間で強いマルチパス現れている．伝搬実験により得られた再現波形で確認できる最も強い 3 波について見てみると，波 1 は直接波，波 2 は直接波より 6 ns の遅延を持って到来しており，実環境におけるアンテナと障害物の位置関係と照らし合わせると，アンテナの周辺の金属散乱物からの反射波と推察される．また，波 3 は直接波より 11 ns

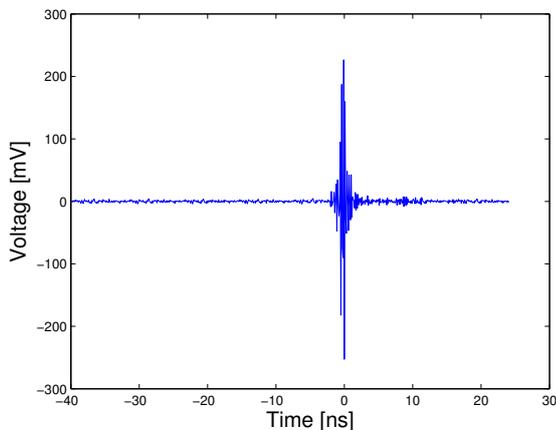


図 13 送信アンテナ直下における送信波形

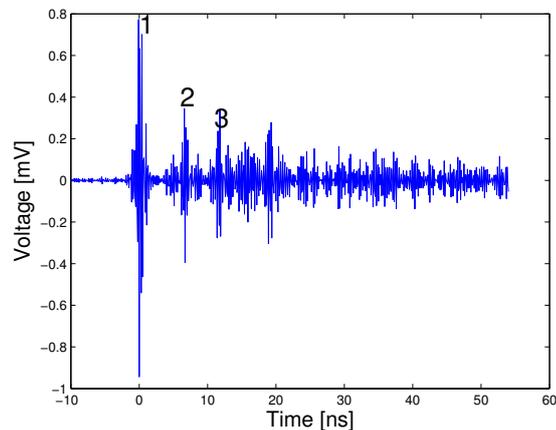


図 14 再現された受信波形

の相対遅延時間で到来しており、図 9 において送受信アンテナの右側にある金属壁からの反射波と考えられる。

振幅に注目すると、2つの波形において、そのピークがほぼ同じ値になっていることが分かる。なお、2つの波形の相関を計算した結果 0.18 となり、低い値となった。この原因としては、測定受信波形に平均化処理の後であっても依然として無視できない大きさの雑音が存在しており、特に弱い送信電力を持つ UWB 信号に対しては、信号成分を観測する際に大きな問題になる。今後、雑音レベルを下げる、もしくは送信側にパワーアンプを入れるなどして SNR を改善させる必要がある。

6. まとめ

本稿は、特定の環境において UWB 伝送特性を評価するための有効な方法としてストアドチャネルシミュレーションに注目し、その有効性を実験的な立場から検証した。UWB 波形伝送テストベッドで得られた受信波形と実伝搬路の伝達関数を用いたストアドチャネルシミュレーションより得られた受信波形を比較した結果、電波伝搬路に存在する強

いマルチパスに対応する応答は概ね一致した。一方、雑音による波形の歪みが依然大きく、波形そのものの正確な比較のために SNR の改善に関する検討を行う予定である。

謝 辞

本研究を行うにあたり実験施設を提供していただいた独立行政法人情報通信研究機構 医療支援 ICT グループ、および UWB テストベッドの使い方を指導していただいた同研究機構の元研究員 陸田 裕子氏に感謝を致します。

参考文献

- (1) J. Foerster et al. "Channel modeling sub-committee report (final)," IEEE P802.15-02/490r1-SG3a, Feb. 2003.
- (2) A. F. Molisch et al. "IEEE 802.15.4a channel model - final report," IEEE P802.15-04/662r0-SG4a, Nov. 2004.
- (3) 滝沢 賢一, 藤田 卓, 陸田 裕子, 浜口 清, 河野 隆二, "屋内伝搬測定結果を用いた準ミリ波帯 UWB 無線通信方式の性能評価," 信学技報 IT2005-65, ISEC2005-122, WBS2005-79, Mar. 2006.
- (4) J. Keignart, C. Abou-Rjeily, C. Delaveaud, N. Daniele, "UWB SIMO channel measurements and simulations," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 54, no. 4, pp. 1812-1819, Apr. 2006.
- (5) 滝沢 賢一, 西山 巖, 陸田 裕子, "UWB テストベッドを用いた UWB 方式の評価," 信学技報, WBS2004-8, June 2004.
- (6) T. Taniguchi and T. Kobayashi, "An omni-directional and low-VSWR antenna for the FCC-approved UWB frequency band," in *Proc. 2003 IEEE AP-S Int. Symp. (AP-S '03)*, pp. 460-463, Ohio, USA, June 2003.