

UWB 信号の見通し内伝搬損失距離特性

佐藤 隼介[†] 小林 岳彦[†]

[†]東京電機大学 大学院 工学研究科

〒101-8457 東京都千代田区神田錦町 2-2

[†]独立行政法人通信総合研究所 UWB 結集型特別グループ

E-mail: shunsuke@grace.c.dendai.ac.jp

あらまし UWB(ultra wideband)技術は室内など短距離での超高速通信や超高精度測距を可能とするものであり、また、低電力で用いるならば既存の狭帯域ワイヤレスシステムと周波数が共用できることから、実質的に新たなスペクトル資源を開発するものとして期待されている。UWB ワイヤレスシステムと既存のシステムとの周波数共用条件を明らかにするためには、非干渉側システムまでの伝搬損失特性を明らかにする必要がある。これまで、自由空間伝搬損失や単純化した 2 波モデルが用いられてきた。本報告は、直接波および平面大地からの地表反射波が存在する場合の UWB 2 波モデル式を導出して、次のことを明らかにした：(1)UWB 信号では狭帯域信号と異なり、2 波の干渉によるフェージングの深さが浅い；(2)UWB 信号でも狭帯域信号と同様に距離減衰係数が 2 程度から 4 へ変化するブレイクポイントが出現する；(3)ブレイクポイントの位置は送受信アンテナ高、信号の上限および下限周波数の波長の算術平均および帯域幅に依存する。屋内実験によりこのモデルの妥当性を検証した。
キーワード UWB, 伝搬損失, 距離減衰係数, 2 波モデル, ブレイクポイント

Path-Loss Exponents of Ultra Wideband Signals in Line-of-Sight Environments

Shunsuke SATO[†] and Takehiko KOBAYASHI[†]

[†]Graduate school, Tokyo Denki University

2-2 Kanda-nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8457, Japan

[†]UWB Technology Institute, Communications Research Laboratory

E-mail: shunsuke@grace.c.dendai.ac.jp

Abstract Ultra wideband (UWB) technology is expected to realize high-speed communication, high-resolution radars, precise geolocation, and other applications. It is also to expect develop substantially new spectrums resource, if the UWB devices can share the frequency spectra with the incumbent narrowband wireless systems. Whereas indoor and short-range propagation characteristics of UWB signals have been intensively studied, the longer range UWB propagation needed to investigate the electromagnetic compatibility between the narrowband and UWB systems has not yet been precisely characterized. This report proposes a new UWB line-of-sight path loss formula based on the conventional narrowband two-path (direct and ground reflected waves) model, taking into account the bandwidth of signals. The following results are derived from numerical calculations: (1) UWB signals suffer less interference fading than narrowband signals; (2) UWB path loss exponents change 2 to 4 around a breakpoint; and (3) the breakpoint distance depends on the transmitting and receiving antenna heights, the arithmetic average by wavelength of lowest and highest frequency, and bandwidth. Indoor experimental results verified the validity of this new formula.

Keywords Ultra wideband, path-loss exponent, two-path model, breakpoint

1. はじめに

UWB(ultra wideband)技術は既存の狭帯域ワイヤレスシステムと周波数を共有し超広帯域を使用することにより、超高速通信、高精度の測位・測距、地中探査や壁面透過レーダなどへの応用が期待されている。UWB 信号の伝搬については、WPAN(wireless personal area network)への応用を中心として、短距離の特性が盛んに研究されている。しかし、UWB ワイヤレスシステムと既存のシステムとの周波数共用条件を明らかにするためには、非干渉側システムまでの伝搬損失特性を明らかにする必要がある。UWB デバイスと既存の狭帯域無線サービスとの周波数共用条件を検討している ITU-R Task Group 1/8 は、EMC 検討のための UWB 伝搬モデルの提供を ITU-R SG3 に要請している[1]。

UWB 信号の伝搬損失モデルとして、従来は自由空間伝搬モデル(距離減衰係数 = 2)が最もよく用いられてきた。その他に、ITU-R TG1/8 では狭帯域の 2 波モデルに基づいて、数 m 以内の UWB 伝搬においてブレイクポイント距離を 2 m と仮定し、ブレイクポイント以内では距離減衰係数が 2、ブレイクポイント以外では 4 という見通し内伝搬モデルを暫定的に提示している[2]。また、ITU-R Rec. P.1411[3]モデルで勧告されている UHF および SHF 帯での狭帯域市街地伝搬モデル(2 波モデルに基づく)を UWB に拡張し、1 km 程度までの伝搬損失を計算したのも報告されている[4]。しかし、これらの簡単な UWB 伝搬モデルは距離が限定されていたり、ブレイクポイント距離以内の領域での伝搬特性が必ずしも明確でないなどの問題がある。また、実験による検証が行われていない。そこで本報告では、任意の周波数帯域幅の UWB 信号の 2 波モデル(直接波 + 地表反射波)伝搬特性を求める計算式を提案し、ブレイクポイント距離以内および以遠の伝搬特性やブレイクポイント距離の帯域幅依存性を明らかにした。さらに、スケールモデルとしての実験によりこのモデルの妥当性を検証した。なお、見通し外の伝搬損失は見通し内よりも 10~20 dB 以上大きくなるので、ここでは見通し内のみを検討する。

2. 従来の 2 波モデル

2.1. 狭帯域 2 波モデル

2 波モデルとは、図 1 に示すように送受信アンテナ間に見通しがあり、かつ平面大地からの反射波が 1 波存在する場合の伝搬路モデルである。狭帯域における伝搬損失 L [dB]は、送受信アンテナ間距離 d 、送信アンテナ高 h_T 、受信アンテナ高 h_R 、波長 λ 、大地の反射係数を $\gamma \exp(j\phi)$ と置けば式(1)で表される[5][6]。

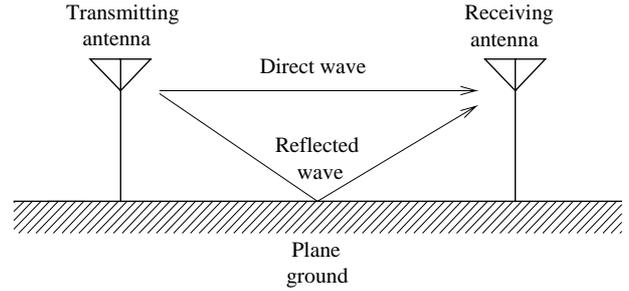


図 1 2 波モデル

Fig. 1. Two-path model.

$$L = 10 \cdot \log \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \left\{ 1 + \gamma^2 + 2\gamma \cos \left(\frac{2\pi \Delta l}{\lambda} + \phi \right) \right\} \right]^{-1} \quad (1)$$

式(1)中の Δl は直接波と反射波の伝搬距離差であり、 $d \gg h_T, h_R$ の場合は次式で与えられる。

$$\Delta l \cong \frac{2h_T h_R}{d} \quad (2)$$

$d \gg h_T, h_R$ ならば $\gamma \approx 1$ 、 $\phi \approx \pi$ (ほぼ全反射)と見なせる。伝搬距離が短い場合には直接波と反射波の干渉によって伝搬損失は距離とともに激しく変動し、その包絡線は距離の 2 乗に比例する。一方、送受信アンテナ高に比べて伝搬距離が十分に長くなると、伝搬損失は距離の 4 乗に比例してなめらかに増加する。近距離で包絡線の距離減衰係数が 2 となる領域と、遠方で 4 となる領域の境界をブレイクポイントと呼ぶ。2 波の光路長差が半波長となる距離(第 1 フレネルゾーン距離) D_f は次式で与えられる[6]

$$D_f = \frac{4h_T h_R}{\lambda} \quad (3)$$

D_f は極大値が現れる最大の距離である。この D_f をブレイクポイント距離としている文献[7]もあるが、両対数グラフ(横軸が距離の対数、縦軸が伝搬損失[dB])上で傾斜が d^2 の包絡線近似直線と傾斜 d^4 の直線が交わる点をブレイクポイントと定義するならば、ブレイクポイント距離は、次式になる[8]。

$$D_b = \frac{2\pi h_T h_R}{\lambda} \quad (4)$$

送受信アンテナ高を 1 m としたときの、FCC が認可した UWB 帯域[9]の下限および上限周波数である 3.1GHz および 10.6 GHz における連続波(CW)の 2 波モ

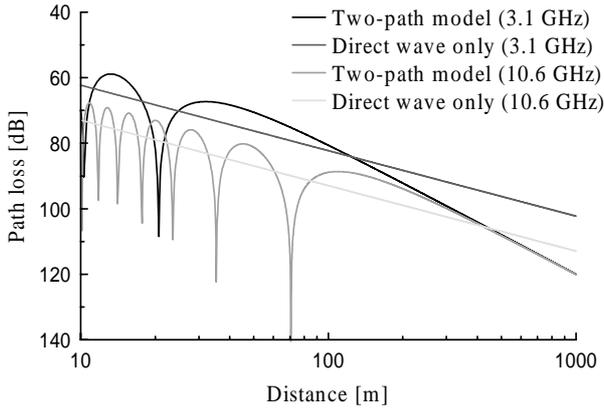


図 2 2 波モデルおよび直接波のみによる連続波の伝搬損失距離特性, $h_T=h_R=1$ m, 周波数=3.1 GHz および 10.6 GHz .

Fig. 2. Path loss vs. distance calculated with the two-path model and direct wave only. $h_T=h_R=1$ m, frequency=3.1 and 10.6 GHz.

表 1 2 波伝搬モデルによる連続波の D_f および D_b

Table 1 D_f and D_b calculated with the two-path model.

Frequency	D_f	D_b
3.1 GHz	41.6 m	64.9 m
10.6 GHz	142 m	222 m

デルおよび直接波のみである, 自由空間段損失の距離特性を図 2 に示す. また, これらの条件における D_f および D_b は表 1 のようになる.

このモデルは見通し内伝搬モデルとして広く用いられており, UHF 帯のみならず SHF 帯でも有効であることが実験的にも確認され[10], ITU-R 勧告にも取り入れられている[3]. ただし, 市街地(特に道路上)においては, SHF 帯では路上に存在する車輛, 人間, 植栽, その他の影響により, 等価的に路面がかさ上げされたと考えることが妥当であると考えられ, その場合の D_f は次のように表される.

$$D_f = \frac{4(h_i - h)(h_r - h)}{\lambda} \quad (5)$$

等価路面高 h は, 交通量の多い日中では 1.3 ~ 1.6 m, 交通量の少ない夜間では 0.2 ~ 0.7 m 程度である. 等価路面高が送受信アンテナよりも高くなると, ブレークポイントは消滅する[3][10].

2.2. 従来の UWB 2 波モデル

文献[2]では, 狭帯域の 2 波モデルに基づいて, 数 m 以内の UWB 伝搬においてブレークポイント距離を 2m と仮定し, ブレークポイント以内では距離減衰係数が

2, ブレークポイント以遠では 4 というモデルを提示している. しかし, ブレークポイント距離を 2 m とした根拠が示されていない.

また文献[4]では, D_f 以内では距離減衰係数 = 2, D_f 以遠では 4 として, 以下の式を与えている.

$$Path - Loss = L_{bp} + \begin{cases} 20 \log \left(\frac{d}{D_f} \right) \rightarrow d \leq D_f \\ 40 \log \left(\frac{d}{D_f} \right) \rightarrow d > D_f \end{cases} \quad (6)$$

$$D_f \approx \frac{4h_t h_r}{\lambda}, \quad L_{bp} = \left| 20 \log \left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_t h_r} \right) \right|$$

式(6)のモデルでは $d > D_f$ の領域が自由空間伝搬損失で与えられるため, $d > D_f$ の領域における干渉によるレベルの変動が考慮されていない. また, λ としてどの周波数に対応する波長を取るのが示されていない.

3. 新しい UWB 2 波モデル式の提案

3.1. 新しい UWB 2 波モデル式

UWB 信号の伝搬損失を式(1)の信号の上限および下限周波数に対応する波長にわたって積分したもので表わす:

$$L = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{\lambda_L - \lambda_H} \int_{\lambda_H}^{\lambda_L} \left(\frac{\lambda}{4\pi l} \right)^2 \left\{ 1 + \gamma^2 + 2\gamma \cos \left(\frac{2\pi l}{\lambda} + \phi \right) \right\} d\lambda \right]^{-1} \quad (7)$$

ここで大地の複素誘電率の周波数分散が無視できない場合には, γ も λ の関数になる. 以下の数値計算は $\gamma=1$, $\phi=\pi$, として行っている. 式(7)において送受信アンテナ高を 1 m としたときの, FCC が認可した UWB 帯域幅 (3.1-10.6 GHz) における伝搬損失距離特性を自由空間伝搬損失とともに図 3 に示す.

連続波 (3.1 および 10.6 GHz) の 2 波モデル伝搬損失 (図 2) と比較すると, 距離 100 m 程度以下で, 連続波の場合のような激しい変動は見られないものの, 必ずしも距離の 2 乗に比例する直線に乗るわけではなく, 緩やかに変動をしている. これは, 3.1 - 10.6 [GHz] 間の干渉パターンが打ち消しあった結果, 図 2 と比べてなめらかなカーブになると考えられる. 距離 100 m 以上では距離減衰係数は連続波の場合と同様に 4 となる.

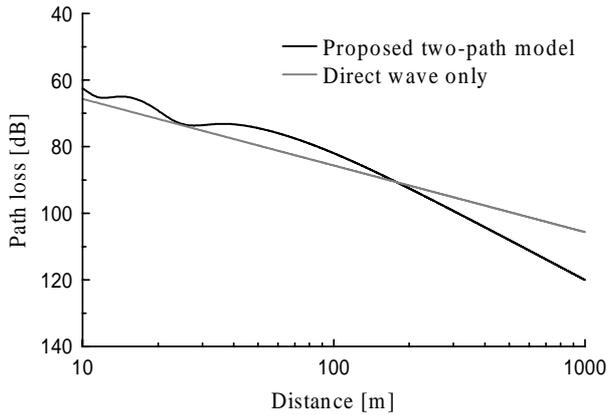


図3 UWB 2波モデル(式(7))で計算される UWB 伝搬損失距離特性, $h_T=h_R=1$ m, 周波数=3.1 - 10.6 GHz.
Fig. 3. Path loss vs. distance calculated with the UWB two-path model (Eq. (7)), $h_T=h_R=1$ m, frequency = 3.1 to 10.6 GHz.

3.2. 帯域幅依存性

式(7)を計算するときの周波数帯域幅を 3.1 GHz を下限として 1 桁ずつ変化させたときの伝搬損失特性を図4に示す。帯域を広げていくと干渉性フェージングの深さが浅くなる。逆に、帯域幅が狭くなるほど干渉性フェージングが深くなり、帯域幅 = 75 MHz では、単一周波数の特性とほとんど変わらなくなる。帯域幅が広がるとブレイクポイント距離が漸増する。

3.3. ブレイクポイント距離

狭帯域におけるブレイクポイントは式(3)あるいは(4)で定義されている。しかし, UWB においては式(3), (4)中の λ をどの周波数の波長とするかが分かっていない。ここでは, [8]と同様に包絡直線と傾きが4乗の直線との交点をブレイクポイントと定義し, 図4に示したような計算結果からブレイクポイント距離を求めた。ブレイクポイント距離とブレイクポイント以前および以遠の傾きを表2に, また, 3.1 GHz を下限周波数として帯域 1GHz ずつ広げていった時の包絡直線と傾きが4乗の直線との交点をブレイクポイント距離とし, 式(4)の λ に各種定義波長(上限周波数, 下限周波数の波長およびそれらの算術平均, 幾何平均)におけるブレイクポイント距離との誤差を図5に示す。図5より波長の算術平均を採用した場合が, 帯域を広げていっても, 提案したブレイクポイントと, 最もよく合致することがわかる。

また, 下限周波数を FCC 定義帯域幅における最低周波数の 3.1 GHz, ハイバンドで使用されると思われる 6.0 GHz, 車載レーダ等に使用される 22.0 GHz における上限および下限周波数の波長における算術平均のブレイクポイントとの誤差を図6に示す。図6より下限

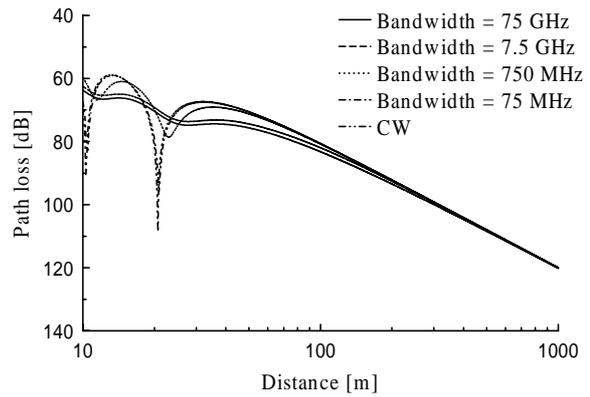


図4 UWB 2波モデルで(式(7))で計算される下限周波数を 3.1 GHz とし帯域を変化させた場合の UWB 伝搬損失距離特性, $h_T=h_R=1$ m.
Fig. 4. Path loss vs. distance for various bandwidths starting from 3.1 GHz calculated with the UWB two-path model (Eq. (7)), $h_T=h_R=1$ m.

表2 ブレイクポイント距離 D_b と距離減衰係数

Bandwidth [GHz]	Breakpoint distance [m]	Path loss exponent	
		$d < D_b$	$d >> D_b$
75	114	1.8	4.0
7.5	97	1.8	4.0
0.75	72	1.9	4.0
0.075	65	2.0	4.0
0.0075	64	2.0	4.0
CW	64	2.0	4.0

Lowest frequency = 3.1 GHz.

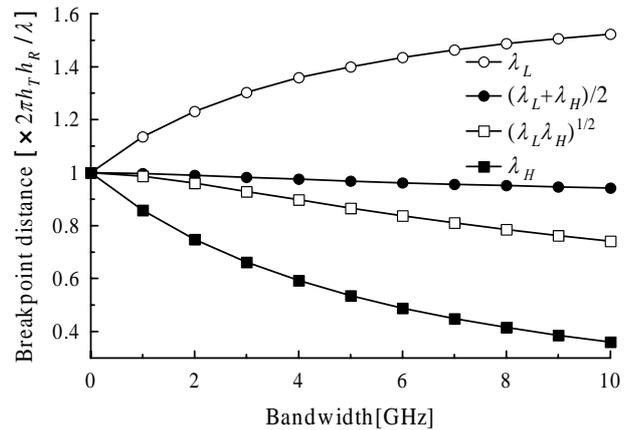


図5 モデル式によるブレイクポイントと各種定義波長のブレイクポイントの比較および帯域幅倍率特性

Fig. 5. breakpoint distance vs. bandwidth. The lowest frequency = 3.1 GHz

周波数を増加させていくと理論値との誤差が少なくなることがわかる。

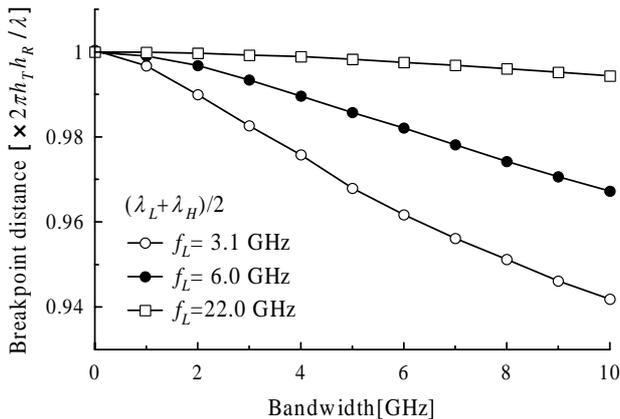


図 6 モデル式によるブレイクポイントと各下限および上限周波数の波長における算術平均のブレイクポイントの比較および帯域幅倍率特性 .
Fig. 6. breakpoint distance vs. bandwidth. The lowest frequency = 3.1, 6.0 and 22.0 GHz

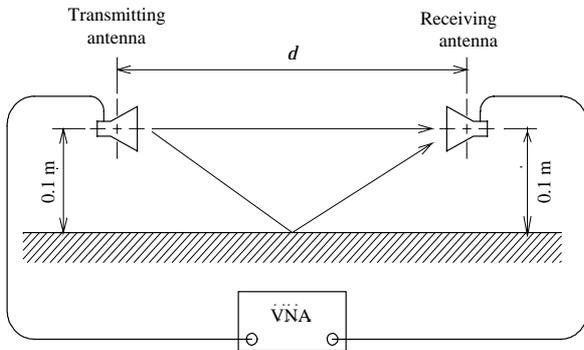


図 7 UWB 伝搬特性測定システム

Fig. 7. Ultra wideband path loss measurement setup.

表 3 伝搬特性測定諸元

Table 3 Parameters of UWB path-loss measurements.

Frequency	3.1-10.6 GHz
Polarization	Vertical
Transmitting and receiving antennas	Double-ridged waveguide horn antennas
Transmitting and receiving antenna heights (h_T and h_R)	0.1 m

4. 実験による検証

図 7 のように、ベクトルネットワークアナライザ (VNA) を用いて屋内環境において S_{21} の周波数特性を測定し、それを周波数について積分して UWB 受信電力を求め、伝搬損失を算出した。表 3 に測定の諸元を示す。測定に使用したダブルリッジホーンアンテナの開口面寸法が $117 \text{ mm} \times 85 \text{ mm}$ であるため、開口面アンテナの近傍領域の定義式 $R=2D^2/\lambda$ [11] よりアンテ

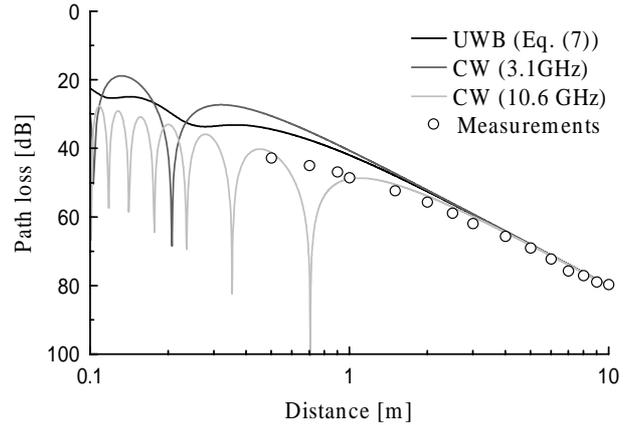


図 8 UWB 伝搬損失の実測値と UWB 2 波モデル(式 (7))の比較 .

Fig. 8. Comparison of the UWB path loss measurements and the UWB two-path model. (Eq. (7)).

ナから 0.5 m 以内は近傍界となるため、 $d > 0.5 \text{ m}$ の範囲を測定した。また、電波暗室において伝搬損失の距離特性を求め、距離減衰係数が 2 となるように、アンテナ電気中心を決定した。送受信アンテナ高を 0.1 m としているので $D_b=0.97 \text{ m}$ である。

UWB 伝搬損失の測定結果と UWB 2 波モデルの計算値の比較を図 8 に示す。 $D_b = 0.97 \text{ m}$ 以内では連続波と異なり、深いフェージングは生じていない。また、 $D_b = 0.97 \text{ m}$ より遠ではほぼ距離減衰係数が 4 となり提案する UWB 2 波モデルの妥当性が検証された。

5. まとめ

直接波および平面大地からの地表反射波が存在する場合の UWB 2 波モデル式を導出して、次のことを明らかにした：(1)UWB 信号では狭帯域信号と異なり、2 波の干渉によるフェージングの深さが浅い；(2)UWB 信号でも狭帯域信号と同様に距離減衰係数が 2 程度から 4 へ変化するブレイクポイントが出現するが、ブレイクポイント以内でも直線にはならず緩やかに変動する；(3)ブレイクポイントの位置は送受信アンテナ高、信号の上限および下限周波数の波長の算術平均および帯域幅に依存する。さらに、屋内実験によりこのモデルの妥当性を検証した。

参考文献

- [1] ITU-R Doc. 3K/66-E, "Liaison statement to working parties 3K and 3M -Propagation models for UWB compatibility studies," Jan. 30, 2003.
- [2] ITU-R Doc. 1-8/047-E, "Chairman, ITU-R Task Group 1-8, Report of the first meeting Task group 1-8, Geneva, 21-24 January 2003," March 28, 2003.

- [3] ITU-R Rec. P.1411-2, "Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz," 2003.
- [4] ITU-R Doc, 1-8/32-E, "Protection distance for UWB interference," Jan 16, 2003.
- [5] K. Bullington, "Radio propagation for vehicular communications," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. VT-26, no. 4, pp. 295-308, Nov. 1977.
- [6] W. C. Y. Lee, *Mobile Communications Engineering*, pp. 116-120, New York, McGraw Hill, 1982.
- [7] K. Siwiak, *Radiowave Propagation and Antennas for Personal Communications*, pp. 205-206, Boston, Artech House, 1998.
- [8] 電波伝搬ハンドブック編集委員会, "電波伝搬ハンドブック," pp. 212-213, リアライズ社, 1999.
- [9] FCC News, "New public safety applications and broadband internet access among uses envisioned by FCC authorization of ultra-wideband technology," Feb. 14, 2002.
- [10] H. Masui, T. Kobayashi, and M. Akaike, "Microwave path-Loss modeling in urban line-of-sight environments," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 20, no. 6, pp. 1151-1155, August, 2002.
- [11] 電子通信学会, "アンテナ工学ハンドブック," pp. 18-19, オーム社, 1980.