

## 2.4GHz帯広帯域伝送における室内電波伝搬特性

佐々木 範雄 (東北電力)      花海 丞 (通研電気工業)      安達 文幸 (東北大学)

### Indoor Propagation Characteristics of Wide band Transmission at 2.4GHz Band

Norio SASAKI (Tohoku Electric Power Co.,Inc.)  
Tasuku HANAUMI (Tsuken Electric Industrial Co.,Ltd.)  
Fumiyuki ADACHI (Tohoku University)

#### Abstract

This paper presents the measured results on statistical characteristics of the indoor propagation which is required for 2.4 GHz broadband wireless LAN design. The received signal power may vary according to the people movements inside an office room. The indoor propagation is often characterized by the line-of-sight (LOS) path propagation, indicating the received signal power follows Nakagami-Rice fading. The received signal power was measured at various locations on the same building floor while office people were working to find its cumulative distribution function (CDF). Our measurements indicate that the measured CDF of the received signal power can be better approximated by the Nakagami  $m$ -distribution than the Nakagami-Rice distribution, particularly in low probability regions of the CDF. It was also found that the measured CDF of the received signal power has almost no dependence on either the height of the transmit antenna or the measurement location. We also measured the CDF of the received signal power when no LOS path exists, i.e., representing the undesired signal propagation, and found that it is also well approximated by the Nakagami  $m$ -distribution. Finally, in this paper, an example of the wireless LAN design is given.

キーワード：無線LAN, 室内伝搬, 仲上 $m$ 分布, フェージング, マイクロ波  
(Wireless LAN, Indoor propagation,  $m$ -distribution, fading, Microwave)

#### 1. ま え が き

近年、高速無線LANシステムへのニーズが高まる中、2.4GHz帯高速無線LANの標準化規格IEEE802.11bが1999年11月に正式承認され、2000年1月より規格製品が提供されている。

これにより無線LANの伝送速度が2Mbpsから11Mbpsへ飛躍的に高速化となり、有線LANの10BASE-Tと同等な速度までになっている。

また、周波数帯域幅も26MHzから83.5MHzまで拡大され、これに従来の帯域幅も含めると97MHzまでの帯域幅が確保されている。

そこで、この97MHz帯域幅内で22MHz帯域

の直接拡散スペクトラム拡散方式(DS-SS: Direct Sequence Spread Spectrum)を用いた場合、互いに独立な4つのチャンネルが割当てられているため、1エリア内のセル分割など可能となり、スループットの向上と転送速度の向上が期待できる。

しかし、ここで問題となるのがIEEE802.11bに準拠した11Mbps伝送における無線LANの回線設計法は必ずしも確立しているとは言い難く、熱雑音設計や干渉雑音設計などを明確に規定できていないことである。

IEEE802.11b規格のDS-SSにおいて伝送帯域幅22MHzの広帯域信号となっているが、広帯域伝搬実験はWCDMAで数多く行われているものの

[1], [2], 2.4GHz帯を用いた広帯域室内伝搬実験は数例報告[3], [4], [5]がなされている程度である。特に希望波や干渉波の瞬時受信レベル分布を定量的に把握しているという点では十分とは言えず、無線LANの回線設計法を確立するまでは至っていない。

そこで、無線LAN回線設計時に必要な希望波や干渉波の瞬時受信レベルの統計的性質を明らかにするため、室内電波伝搬実験を行った。本論文では瞬時受信レベルの変動分布をレイリー分布[6]、仲上-ライス分布[6]および仲上m分布と比較し、仲上m分布[6]で精度良く近似できることを明らかにした。

## 2. 多重波伝搬理論

移動無線においては、受信点周辺の地形や地物により直接波が遮蔽され、反射、散乱、回折等によって、多重波伝搬路が形成される[7],[8]。この場合、受信点では多数の経路を通過した波が干渉し合い、ランダムな定在波性の電磁界分布が形成される。この中を受信点が移動することにより、急激な振幅変動と位相変動を受けフェージングが発生する。

このように直接波が遮蔽され複数の散乱波が受信される場合のフェージングモデルは一般にレイリー分布で表され、瞬時値受信電界強度を $R$ とすると確率密度関数 $p(R)$ は

$$p(R) = \frac{2R}{\Omega} \exp\left(-\frac{R^2}{\Omega}\right) \quad (1)$$

で示される。ここに、 $\Omega = E(R^2)$ であり、記号 $E(\cdot)$ は集合平均を意味する。

また、無線回線の瞬断率や劣化率を表すのに必要とされる確率分布関数はレイリー分布において確率分布関数を $P(R)$ とすれば

$$P(R) = 1 - \exp\left(-\frac{R^2}{\Omega}\right) \quad (2)$$

で表される。

多重伝搬路において複数の散乱波の中に、安定な直接波（もしくは強力な反射波）が重畳された場合、1定常波+レイリー変動波のモデルで説明される。このときの分布は仲上-ライス分布と呼ばれ確率密度関数は次式で表される。

$$p(R) = \frac{2R}{\Omega} \exp\left(-\frac{R^2 + R_0^2}{\Omega}\right) I_0\left(\frac{2RR_0}{\Omega}\right) \quad (3)$$

ここに、 $R_0$ は定常波の振幅、 $\Omega$ は散乱波（レイリー波）の集合平均電力であり、それらの比（ $k \equiv R_0^2/\Omega$ ）が仲上-ライス分布の重要なパラメータになる。 $I_0(\cdot)$ は第1種0次の変形ベッセル関数である。また、仲上-ライス分布の確率分布関数は次式によって与えられる。

$$P(R) = 1 - Q\left(R_0\sqrt{\frac{2}{\Omega}}, R\sqrt{\frac{2}{\Omega}}\right) \quad (4)$$

ここに、 $Q(\cdot, \cdot)$ はマーカムの $Q$ 関数であり、次式で表される。

$$Q(a, b) = 1 - \exp\left(-\frac{a^2 + b^2}{2}\right) \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{b}{a}\right)^m I_m(ab) \quad (5)$$

レイリー分布を拡張し、仲上-ライス分布を高度に近似することのできる仲上 $m$ 分布は、中短波からマイクロ波まで広帯域にわたってのフェージング解析に適用でき、近年移動通信の広帯域信号におけるフェージングの深さを検討[9]するのに用いられている。その確率密度関数は次式で与えられる。

$$p(R) = \frac{2m^m R^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left(-\frac{mR^2}{\Omega}\right), \quad R \geq 0 \quad (6)$$

ここに、 $\Gamma(\cdot)$ はガンマ関数、 $m$ はフェージングの深さを表すパラメータであり、正規化された電力の分散の逆数であり、つまり、

$$m = \frac{\Omega^2}{E(R^2 - \Omega^2)}, \quad m \geq 1/2 \quad (7)$$

によって定義される。さらに、仲上 $m$ 分布の確率分布関数は次式で表される。

$$P(R) = \frac{1}{\Gamma(m)} \gamma\left(m, \frac{mR^2}{\Omega}\right) \quad (8)$$

ここに、 $\gamma(\cdot, \cdot)$ は第1種不完全ガンマ関数である。

これまで示した統計的解析は主に屋外の伝搬モデルを想定したものであるが、室内伝搬においても壁や什器などから反射・散乱波が発生するから、屋外と同様の多重伝搬路が形成される。したがって室内伝搬に関しても、これまで示した多重波伝搬理論が適用できる。

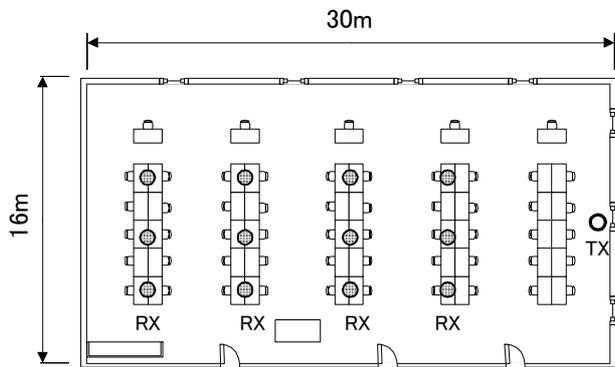


図1 実験フロアのレイアウト  
Fig. 1 Layout of an experimental floor.

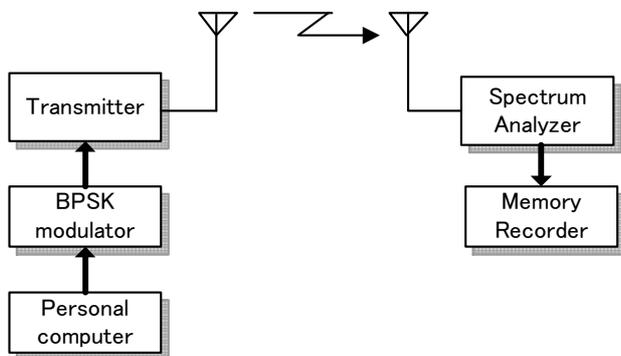


図2 測定系の構成  
Fig. 2 Measurement setup.

### 3. 2. 4 GHz 帯室内伝搬実験

無線LANの使用環境において、希望波は見通し内伝搬となることが言え、干渉波は見通し外伝搬となると言える。この2つの伝搬現象の統計的性質を把握するため伝搬実験を実施した。実験の環境、方法および装置の構成について述べる。

#### 3. 1 実験環境

実験は東北電力(株)営業所が入居しているオフィスビルのフロアで行っている。フロアの広さは図1に示すように、30m×16mで床面積は480㎡である。床はOA用カーペットとなっており、天井は一般的なボードである。壁面は鉄筋コンクリートの他、パーティション用ボードとなっている。机の配置は図1に示すように、横方向に5列配置されており、測定時のフロア内人数は45名から55名程度の範囲内で変動している。

表1 測定系の諸元

Table 1 Experimental parameters.

周波数	2.437GHz
送信出力	10mW/MHz
伝送帯域幅	22MHz
変調方式	BPSK
送信アンテナ高	1.0m, 1.5m, 2.0m
受信帯域幅	10MHz
受信アンテナ高	75cm
サンプリング速度	10ms

#### 3. 2 実験方法

無線LANの使用形態を考えると、クライアント側は静止状態で使用することが主になる。したがって室内伝搬における瞬時受信レベルの変動要因は、メインパスやマルチパスの伝搬路を人が遮ることや通過することで、新たに発生される素波や遅延量変化の影響によるものが大きいと考えられる。したがって、希望波や干渉波の測定方法は通常業務が行われているオフィス内に送・受信アンテナを固定する方法で、前述の影響による瞬時受信レベルの測定を行った。見通し内伝搬となる希望波用送信アンテナTXは図1に示すようにフロア右端に設置し、受信アンテナRXは各列3カ所、合計12ポイントを設定し、そのポイントの机上に設置し測定を行った。このとき測定するポイントや時間帯はランダムに抽出し、1カ所10分間程度の測定を3回繰り返し行った。

つぎに、見通し外伝搬となる干渉波用送信アンテナは廊下を挟んだ隣接フロア内に設置し、希望波の測定と同様な手順で測定を行った。

#### 3. 3 実験装置の構成

実験に用いた送信装置は無線LAN用の送信モジュールを使用し、受信装置はスペクトラムアナライザを受信機として使用した。送信の中心周波数は2.437GHz、伝送帯域幅は22MHz、送信電力は10mW/MHzである。

また、スペクトラムアナライザの受信帯域幅は10MHz<sup>(注1)</sup>に設定しており、その帯域幅で受信した瞬時受信電界強度をデジタル記録の可能な、

(注1): 伝送帯域幅22MHzに対して受信帯域幅は10MHzと測定帯域幅に相違があるが、10MHzと20MHzの帯域幅で測定した場合の、瞬時受信レベル分布特性には大きな相違は無いものとする[10]。

メモリーレコーダに記録している。メモリーレコーダのサンプリング速度はオフィス内での人の移動速度を 1m/s 程度と考えれば、低速で十分であることから 10ms(100Hz)とした。

送信アンテナは 1.0m,1.5m,2.0mの各高さに設置し、受信アンテナは机の高さと同じ 75cmに設置している。なお、干渉波用送信アンテナは今回の実験では 1.5mのみの高さで測定を実施している。測定系の構成を図2に、測定諸元を表1に示す。

#### 4. 測定結果

スペクトラムアナライザの掃引帯域幅を 25MHz で測定した時の、受信信号のスペクトラム波形を図3に示す。伝送帯域幅 22MHz 内のパワー密度の受信波形に歪が生じており、一定ではないことが分かる。これは遅延のあるマルチパスがフロア内で発生していることを示し、いわゆる周波数選択性フェージングが発生していることが分かる。このような、室内伝搬における希望波および干渉波の瞬時受信レベル変動の測定結果を、レイリー分布、仲上-ライス分布および仲上  $m$  分布と比較する。

##### 4.1 希望波の瞬時受信レベル変動

伝搬距離など測定点位置の違いによる希望波瞬時受信レベル分布の実験結果を図4(a),(b),(c)に示す。横軸が瞬時受信レベルと平均受信レベルとの相対レベルを dB で表したものであり、縦軸が横軸の値以下となる時間率を%で表したものである。

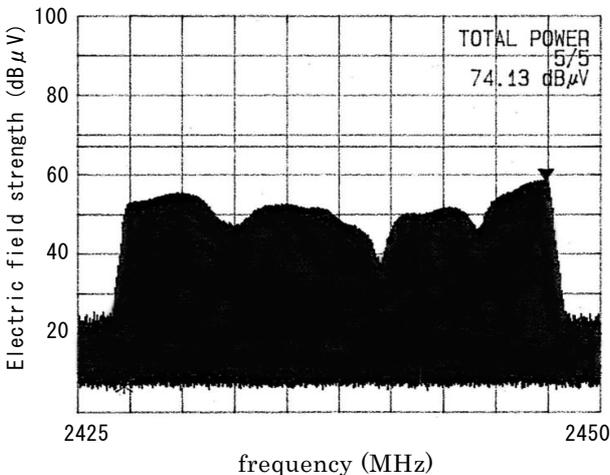
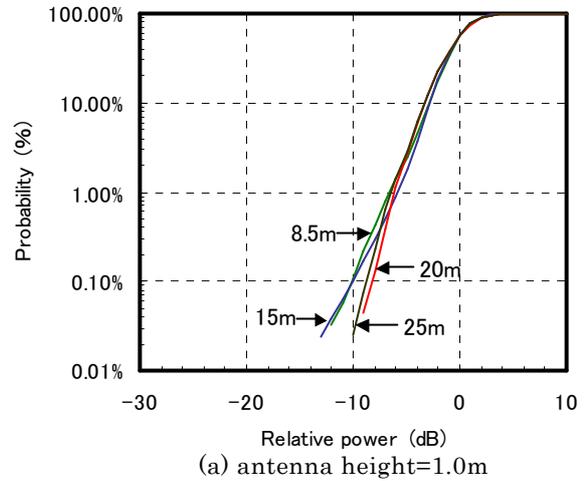
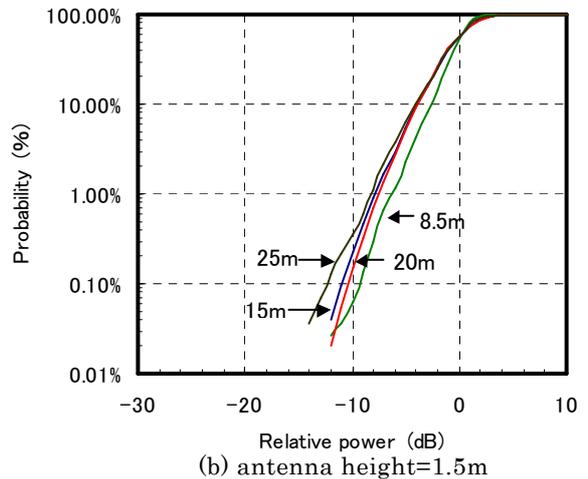


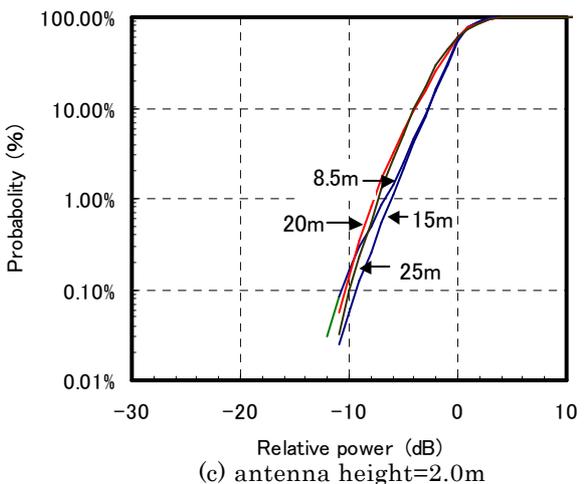
図3 受信信号のスペクトラム  
Fig. 3 Spectrum of Received signal.



(a) antenna height=1.0m



(b) antenna height=1.5m



(c) antenna height=2.0m

図4 アンテナ高の及ぼす各測定位置での受信電力累積分布への影響

Fig. 4 Influence of measurement location on CDF of received signal powers for different antenna heights.

測定距離は図1に示すように、送信アンテナTXから各機の受信アンテナRXまでの距離8.5m,15m,20m,25mである。(a)はアンテナ高1.0m,(b)はアンテナ高1.5m,(c)はアンテナ高2.0mの累積分布特性である。図4に示すように測定点位置の違いによる累積分布特性は確率の小さい部分(信号強度の低下量が大きいところ)で違いはあるものの同様な分布を示しており、測定点位置による依存性は、ほとんど見られないことが分かる。

測定点位置による依存性はほとんど見られないことなので、各距離の全データを一つに扱い、アンテナ高の違いによる希望波瞬時受信レベル分布特性を示したのが図5である。図5から分かるように送信アンテナ高の位置による受信電力の累積分布の違いは確率の小さい部分で見られるものの、アンテナ高による相違はほとんど見られないことが分かる。

以上、広帯域室内伝搬の瞬時受信レベルの分布は、送信アンテナ高や同一フロアであれば測定位置による依存性は、ほとんどないことが示されている。ここに瞬時受信レベル分布特性に影響を与えるパラメータとしては見通しの有無、通路長差、素波の数、受信帯域幅などであるが[10]、今回の測定条件では通路長差、素波の数が分布に影響を与えることになる。このことから、送信アンテナ高や測定位置による分布の相違は、ほとんど見られないため、人がメインパスやマルチパスの伝搬路を遮ることや通過することの影響は、どのアンテナ位置、どの場所でも一様で、その通路長差や素波の数は同一フロア内であれば、ほぼ同程度になっているものと推定できる。

つぎに、フロア全体の受信電力の累積分布特性を示すため、全測定位置でのデータ(3758915データ)を用い、表したのが図6の全測定位置データでの受信電力累積分布である。点線が実測の累積分布であり、実線はレイリー分布と仲上-ライス分布および仲上 $m$ 分布の計算値を示している。仲上-ライス分布と実測値との関係は、 $K$ ファクターが2.8の場合にもっとも標準誤差が小さく、よい一致を示す値となっているが、確率の低いところでの乖離が大きくなっている。

また、仲上 $m$ 分布と実測値との関係はフェージングパラメータ $m=3.7$ の場合にもっとも標準誤差が小さく、仲上-ライス分布より確率の低いところでも、よい一致をしている。ここで $K$ と $m$ は値が大きいほど受信レベル変動が小さいことを表し、逆に小さいほど変動が大きいことを表してお

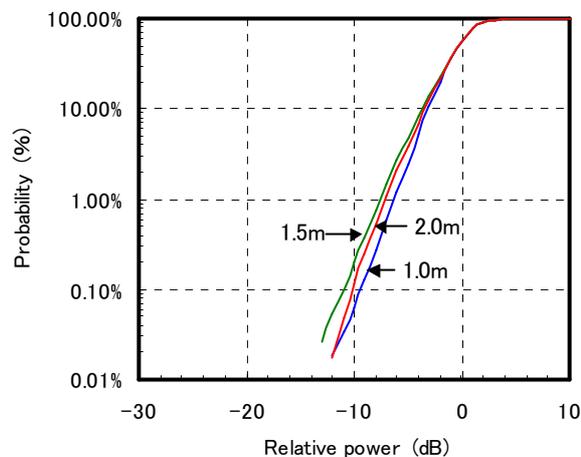


図5 アンテナ高の及ぼす受信電力累積分布への影響  
Fig. 5 Influence of antenna height on CDF of receive signal powers.

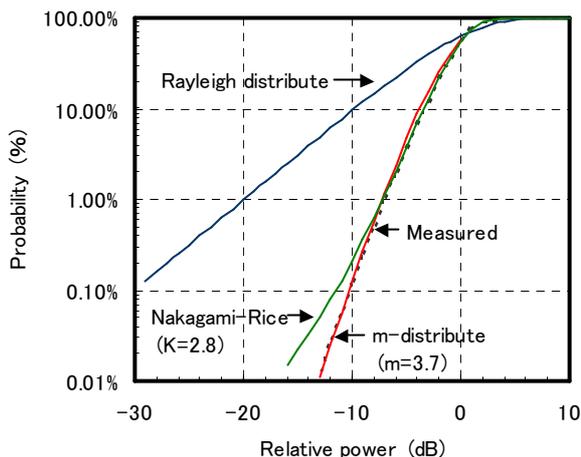


図6 全測定位置データでの受信電力累積分布  
Fig. 6 Combined CDF of received signal powers measured at all locations.

り、 $K=0$ の場合、 $m=1$ の場合それぞれレイリー分布となる。

以上、今回の広帯域伝送室内伝搬において、希望波瞬時受信レベル変動は深いフェージングの発生する確率は小さく、比較的安定している伝搬路となっていることが分かる。また累積確率分布の確率の小さい部分を評価する場合においては、仲上-ライス分布を用いるよりも仲上 $m$ 分布を用いることが好ましいことが分かる。

#### 4.2 干渉波の瞬時受信レベル変動

見通し外伝搬となる干渉波の全測定位置データでの受信電力累積分布を図7に示す。データは希

望波の場合と同様に、各机上で測定した全データ(508986データ)を一つとして扱ったものである。図7から分かるように点線で示した実測の累積分布特性と、実線で示した $m=5.5$ の仲上 $m$ 分布とは良く一致している。このことから、見通し外伝搬となる干渉波の瞬時受信レベル変動は希望波と同様、仲上 $m$ 分布で説明できることが分かる。

ここで、希望波と干渉波を比較した場合、フェージングパラメータとなる $m$ 値は干渉波の値が大きくなっており、今回の実験においては干渉波の方がフェージングの深さが小さいことを意味している。

これは、今回の室内実験環境において、見通し外伝搬となっているものの、壁、ドア、廊下などを通して、伝搬距離の短い素波が多数存在しているためと推定される。つまり、前述で説明したように瞬時受信レベルの分布特性は通路長差、素波の数で決定され、なおかつフェージングの深さは、通路長差が大きいほど、もしくは素波の数が多いほど小さくなることが言われている[10]。

したがって、今回の実験では前述で推定した伝搬路環境が設定しているため、見通し内伝搬より多数の素波が発生され、結果としてフェージングパラメータが大きくなったものと考えられる。

また、今回は同一フロアの干渉波の測定であり、異なるフロア間での変動特性は示していない。しかし、この場合も同様、広帯域伝搬であることから、仲上 $m$ 分布を示すことは十分推定される。このことから、室内伝搬の希望波と干渉波の2波変動分布は、ほとんどを仲上 $m$ 分布の比の分布で扱えるものと言える。

## 5. 無線LAN回線設計の一例

無線LAN回線設計を実施するにあたり、仲上 $m$ 分布のフェージング指数である $m$ の値を適当な値に設定することにより、そのフロアにおける瞬時受信レベルの落ち込み量に対する確率が推定出来ることになる。したがって、その確率を所要瞬断率とすれば、平均電力値からの相対レベルが、所要マージンとなる。つまり、図8の熱雑音回線設計フローに示すように、所要瞬断率 $F_t$ と所要伝送品質 $P_e$ を規定すれば所要マージン $\gamma_m$ と所要CNR $\gamma_s$ が求められ、無線機熱雑音KTBFに、この2つのパラメータ加えて所要受信電力 $P_r$ が得られる。また、所要受信電力 $P_r$ に希望波伝搬損値 $L_p$ を加えた算出値と、所要等価等方輻射電力EIRPとを等しく置くことによりセル半径 $C_s$

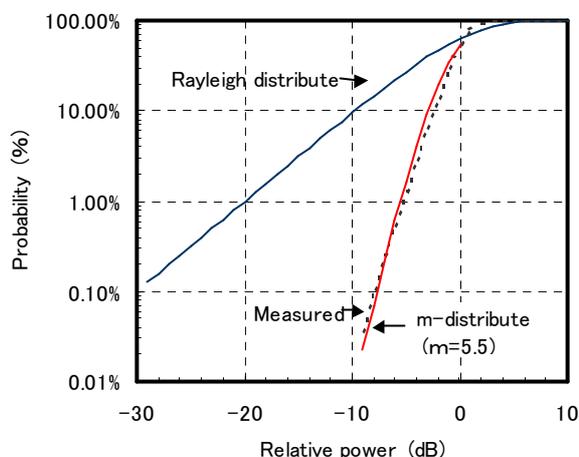


図7 干渉波全測定位置データでの受信電力累積分布

Fig. 7 Combined CDF of undesired signal powers measured at all locations.

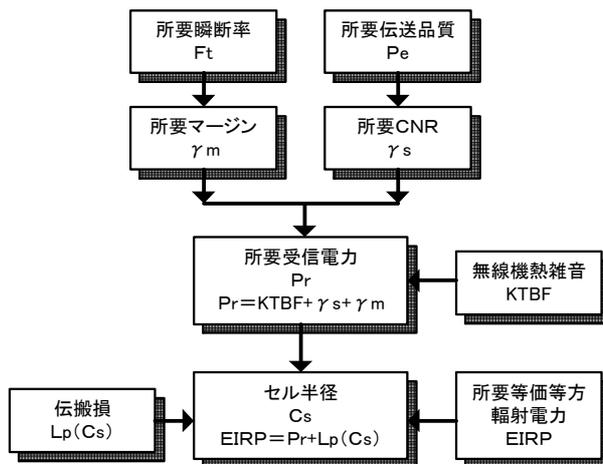


図8 熱雑音回線設計フロー

Fig. 8 Design flowchart for power budget and coverage.

を求めることができる。

なお、干渉雑音設計フローについては、今後検討する仲上 $m$ 分布の比の分布を明らかにした後、報告する考えである。

## 6. むすび

本論文では、2.4GHz帯無線LAN回線設計に必要な室内伝搬現象の統計的性質を明らかにした。最初に、見通し内伝搬となる希望波の瞬時受信レベル変動の分布はアンテナ高および測定点位置に

よる依存性はほとんどないことを示した。また，その瞬時受信レベル分布は仲上 $m$ 分布を用いるより，仲上 $m$ 分布を用いる方が累積確率分布の確率の小さい部分を評価する場合に適していることを明らかにした。

また，見通し外伝搬となる干渉波の瞬時受信レベル変動の分布は，希望波の分布と同様，仲上 $m$ 分布で示された。このことから，希望波と干渉波の2波変動分布はほとんどを仲上 $m$ 分布の比の分布で扱えることが分かった。

今後は，仲上 $m$ 分布のフェージングパラメータである $m$ 値をフロアの広さや人数など，オフィス環境のパラメータで，この $m$ 値を定量的に表す手法を明らかにする考えである。さらに，希望波と干渉波の2波変動分布を明らかにするため，仲上 $m$ 分布の比の分布を用いた理論解析ならびに伝搬実験を行う予定である。

## 文 献

- [1] 森本彰人，福元 暁，樋口健一，佐和橋 衛，安達文幸，“W-CDMA上りリンクにおけるセル間サイトダイバーシチの室内実験，” 信学技報，AP99-130，1999-10.
- [2] 池田武弘，大川耕一，佐和橋 衛，安達文幸，“ブロードバンド DS-SS-CDMAにおけるコヒーレント RaKe 受信の室内実験特性，” 信学技報，AP99-132，1999-10.
- [3] 高橋 一，笠原稔弘，堀越 淳，“2GHz帯における屋内広帯域電波伝搬の推定，” 信学技報，AP99-217，200-2.
- [4] 吉野辰男，山口 彰，多賀登喜雄，“2GHz帯屋内伝搬特性の検討，” 1998 信学ソ大，B-1-19，1998.
- [5] 高谷和宏，前田祐二，桑原伸夫，“2.4GHz帯無線 LAN の異機種間干渉特性，” 信学論 (B-II)，Vol.J80-B-II，No. 3，pp.368-371，April 1997.
- [6] 奥井重彦，“特殊関数とその応用，” 森北出版.
- [7] 奥村善久，進士昌明，“移動通信の基礎，” 電子情報通信学会.
- [8] 進士昌明，“無線通信の電波伝搬，” 電子情報通信学会.
- [9] 小澤文生，小園 茂，“移動伝搬路の等価受信帯域幅による仲上 $m$ パラメータの表現，” 2000 信学ソ大，B-1-16，2000.
- [10] 閻 江，小園 茂，“移動通信の広帯域伝搬路における瞬時受信レベル分布特性の検討，” 信学論 (B)，Vol.J82-B，No.8，pp.1549-1558，August 1999.