

広帯域伝送における室内伝搬のダイバーシチ特性

佐々木 範雄 花 海 丞 (東北電力) 工藤 貴之 (通研電気) 安達 文幸 (東北大学)

Diversity Characteristics of Indoor Propagation for Wide band Transmission

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

Abstract

This paper presents the experimental diversity characteristics of indoor propagation for a 5.2 GHz high-speed wireless LAN. First, the fading characteristics of branch output is well approximated with the Nakagami m-distribution and the mean received power of each is the same.

Also, with the increased antenna interval, the correlation coefficient of the power correlation characteristics between branch outputs tends to be smaller, and when holding the antenna spacing at 1.5λ or more, there is almost non-correlation.

Lastly, the good agreement of the effect of improved indoor diversity between theoretical and actual measurement characteristics allows presuming the effect of the improved diversity by the theoretical expression, and ensuring the antenna interval at about 1λ enables obtaining the required diversity effect.

キーワード：無線LAN, 室内伝搬, ダイバーシチ, 相関係数

(Wireless LAN, Indoor propagation, Diversity, Coefficient of correlation)

1. まえがき

近年、5.2GHz 帯高速無線LANの標準化規格である IEEE802.11a に対応した無線LAN製品が各社から提供されてきている。これら製品にはフェージングを軽減するため、空間的に離れた2個のアンテナで受信する、スペースダイバーシチ受信方式が採用されており、図1に示すような包絡線レベルの高いダイバーシチブランチ信号を選択する、2ブランチ検波後選択合成受信がおもに用いられている。

しかし、無線LANのような広帯域信号が室内伝搬路で発生するマルチパスのフェージングに対し、どれだけスペースダイバーシチ受信方式で影響が軽減できるのか、その検討はほとんどなされておらず、特に5.2GHz帯を用い、PCカード程度のアンテナ間隔(5cm~6cm)でのスペースダイバーシチ特性は明らかにされていない。

そこで、本論文では無線LANの置局設計に必要と

される幾つかのダイバーシチ特性を明らかにするため、前述した周波数帯とアンテナ間隔でのスペースダイバーシチにおいて、相関係数や改善効果について理論的、実験的な検討を行ったので、その結果について報告するものである。

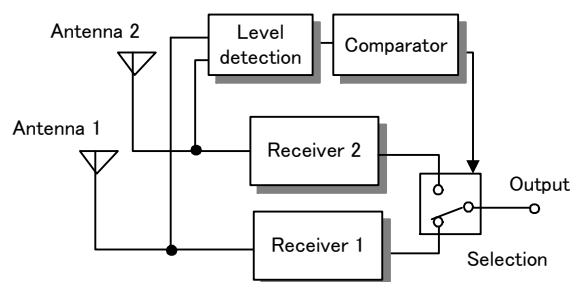


図1 選択合成受信ダイバーシチの構成

Fig.1 Configuration of selection combining diversity.

2. 実験環境と実験方法

実験は床面積 340 m² のオフィスビルのフロアで、30 名程度の社員がいる環境で行った。2 ブランチのダイバーシチ特性を得るために、2 本のアンテナと 2 台のスペクトラムアナライザにより同時刻の瞬時受信入力レベルを測定し、メモリレコーダへ記録した。

送受信アンテナは利得 4dBi の無指向性 2 段コーリニアアンテナを用い、送信アンテナは 2.0m の高さに設置し、2 本の受信アンテナは机の高さと同じ 75cm に約 1 波長となる 6cm 間隔で水平に配置した。

また、室内伝搬における瞬時受信入力レベル変動特性は、測定点位置による依存性は、ほとんど無いことが明らかにされているので[1]、受信局は送信局から 10m 離れた場所に固定し、同一個所で 20 分間の測定を 9 回行なった。さらに、空間相関特性を求めるため、アンテナ間隔を 4.5cm~14cm 間で 7 ポイントを設定し、それぞれのポイントで 20 分間測定した。図 2 に測定系の構成を表 1 に測定系の諸元を示す。

3. 実験結果と解析結果

3. 1 ブランチ出力の受信電力累積分布

実測したブランチ出力の全測定データで、室内伝搬の瞬時受信電力累積分布を示したのが図 3 である。横軸が瞬時受信電力と、平均受信電力との相対受信電力を 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 では、これまでの報告で明らかにしたように[2], [3], 広帯域伝送における室内伝搬のフェージング特性は仲上 m 分布で良く近似され、フェージングの深さを示す m 値は 4.8 になることを示している。

また、アンテナ間隔 1 λ での実験結果から、各ブランチ出力の集合平均受信電力 \bar{R}_1^2 , \bar{R}_2^2 は -62.2dBm, -62.3dBm と同一の値を示す結果が得られたことから、集合平均受信電力は $\bar{R}_1^2 = \bar{R}_2^2 = \Omega$ と仮定できるので、仲上 m 分布フェージング通信路における 2 ブランチ選択合成受信ダイバーシチの受信電力分布関数 P_d は瞬時受信入力レベルを R とすると次式で表わされる。

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

ここに、 Γ はガンマ関数、 γ は第 1 種不完全ガンマ関数、 m は各ブランチ出力のフェージングの深さを表す指数である。よって、(1)式を用い 3. 3 でダイバーシチの改善効果について述べる。

表 1 測定系の諸元

Table 1 Experimental Parameters.

周波数	5.2GHz
送信電力	10dBm
送信帯域幅	20MHz
受信帯域幅	10MHz
記録サンプリング速度	5ms

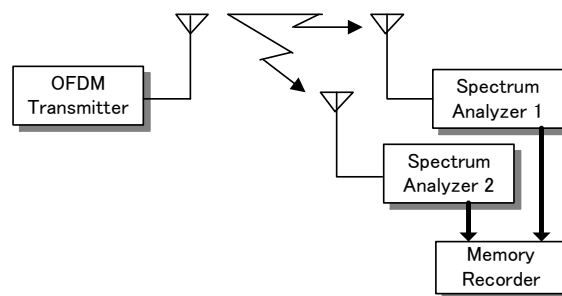


図 2 測定系の構成

Fig.1 Measurement setup.

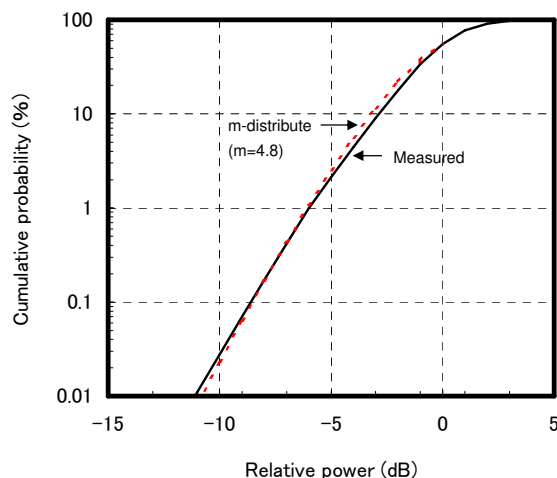


図 3 ブランチ出力による受信電力累積分布と仲上 m 分布の比較

Fig.3 Comparisons of Received signal-level CDF for branch output and m -distribution.

3. 2 ブランチ出力間の電力相関特性

ダイバーシチによるフェージングの軽減効果はブランチ間の電力相関係数と、平均受信電力差により異なり、相関と平均受信電力差が大きいほど、軽減効果は小さくなる[4]。ここでは、両ブランチの平均受信電力は等しくなるとしているため、検討は相関係数のみとする。

移動通信の仲上ーライスフェージング環境において、直接波のほかに散乱波が角度空間的に一様に到来する場合の空間相関 ρ_p は次式で表されることが知られている[4]。

$$\rho_p = \frac{2J_0(\beta d) \cos(\beta d \cos \theta_b) + s^2 |J_0(\beta d)|^2}{2 + s^2} \quad (2)$$

ここに、 J_0 は第1種0次ベッセル関数、 d はアンテナ間隔、 s^2 は平均散乱波電力と直接波電力の比、 θ_b は直接波の到来方向とベースラインの角度差、 β は位相定数で $2\pi/\lambda$ である。

今回の室内伝搬実験において、フェージング環境は仲上m分布であるので、(2)式を適用するには図3に示した仲上m分布と近似する仲上ーライス分布の K ファクター (s^2 と同等) を用いて表す必要がある。なお、仲上ーライス分布関数は次式によって与えられる。

$$P(R) = 1 - Q\left(R_0 \sqrt{\frac{2}{\Omega}}, R \sqrt{\frac{2}{\Omega}}\right) \quad (3)$$

ここに、 R_0 は直接波の振幅、 Ω は平均散乱電力、それらの比 ($K \equiv R_0^2/\Omega$) が K ファクターとなる。また、 $Q(\cdot)$ はマーカムの Q 関数であり次式で表される。

$$Q(a, b) = \int_b^\infty \exp\left(-\frac{a^2 + t^2}{2}\right) I_0(at) dt \quad (4)$$

この両分布が近似する仲上ーライス分布関数の K ファクターは、図4から分かるように $K=10.2\text{dB}$ の時であり、このときの空間相関特性は図5に示すような特性となる。横軸が波長で正規化したアンテナ間隔で、縦軸が相関係数である。また、図5にはアンテナ間隔を直接波と同一方向 ($\theta_b=0^\circ$) で $d/\lambda=0.8\sim 2.4$ 間の7ポイントで測定した相関係数の結果も併せて示している。

今回の実験では(2)式の理論特性とは乖離する結果となっており、室内伝搬においても(2)式の適用は可能という結論には至らなかった。これは、各ポイントの測定時刻において、人が影響を与えて発生するフェージング特性がそれぞれ異なっているため、それが相関係数に影響を与えたものと考えられる。このことから、今後は、実験系や実験方法を見直し、適用性の可否を再度検討する必要があると考える。

しかし、実験結果から分かるように、アンテナ間隔

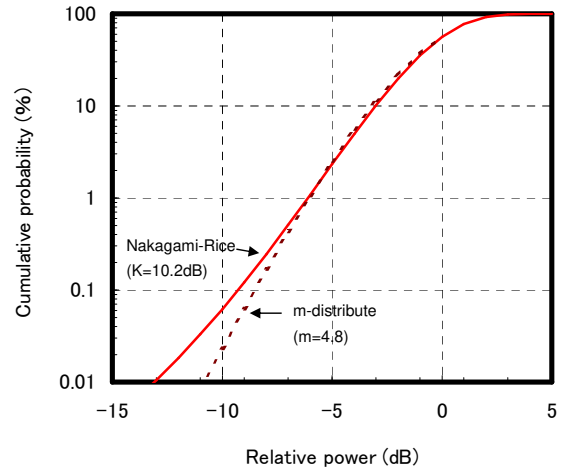


図4 仲上ーライス分布と仲上m分布の近似特性

Fig.4 Approximation characteristics of Nakagami-Rice distribution and m-distribution.

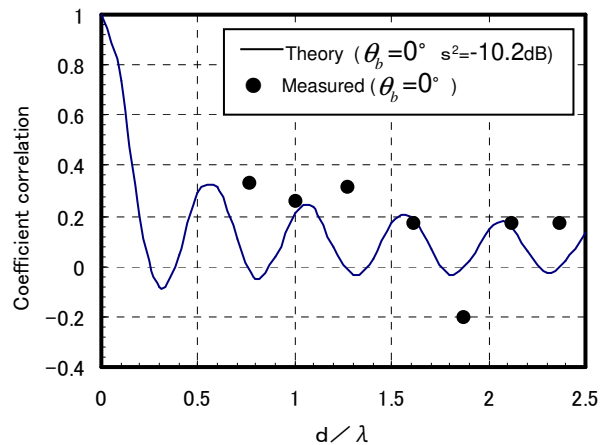


図5 仲上ーライスフェージングの空間相関特性と実測値

Fig.5 Spatial correlation characteristics of Nakagami-Rice fading and measurement value.

表2 アンテナ間隔 1λ の各測定回における相関係数とm値

Table 2 Coefficient of correlation and m-value in each measurement of antenna spacing 1λ .

測定回数	相関係数	m値
1	0.092	7.0
2	0.058	6.1
3	0.042	9.0
4	0.176	4.5
5	0.166	8.0
6	0.174	9.0
7	0.083	5.0
8	0.106	5.8
9	0.486	3.9

を広げて行くにつれて相関係数は小さくなる傾向は示されており、室内伝搬においてもアンテナ間隔が約1.5λ以上を確保できていれば、ほぼ無相関に近づけられることが確認された。

さらに、アンテナ間隔を1λとし、20分間の測定を9回行った時の相関係数と仲上m分布のm値を表2に示している。各測定回ごとの相関係数とm値は異なる結果となっているが、これは前述した空間相関特性と同様に、各測定回ごとのフェージング特性が異なっているために生じたものであり、ダイバーシチの改善効果を議論するには、各測定回ごとの特性で論じることが必要であると言える。

よって、3.3では表2に示す、測定No.1とNo.4とNo.9の特性をサンプルデータとして用い検討を行う。

3.3 ダイバーシチの改善効果

2ブランチ選択合成受信ダイバーシチにおいて、各ブランチの平均受信電力が等しい場合、受信電力累積分布は(1)式で表される。そこで、図6(a),(b),(c)には測定No.1とNo.4とNo.9の単一ブランチ時の実測分布特性と、(1)式の理論ダイバーシチ特性を表2に示す相関係数により相対受信電力値を補正した分布特性、ならびに各ブランチ出力で測定された同時刻の瞬時受信入力レベルを比較し、値の大きいブランチ側の受信データをダイバーシチの選択出力レベルとして採用した実測ダイバーシチの分布特性を示している。

なお、相関係数ρによる相対受信電力の補正值は、仲上m分布のフェージング環境において、相対受信電力値の小さい領域では次式で近似される。

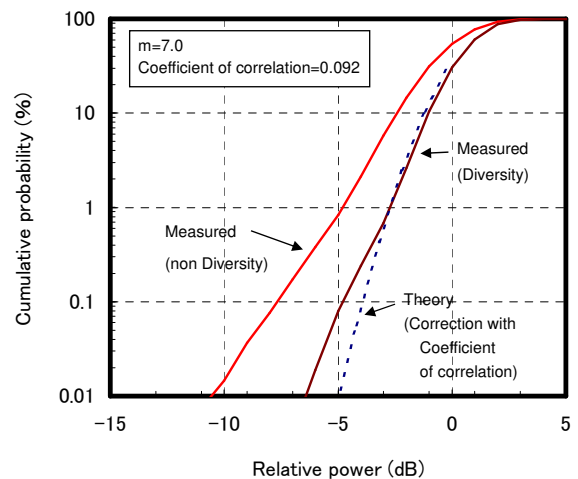
$$\Delta C = 5 \log(1 - \rho) \quad (\text{dB}) \quad (5)$$

ダイバーシチの改善効果は、図6に示されているように、実測単一ブランチの分布特性と実測ダイバーシチ分布特性を比較した場合、フェージングの影響は軽減されているのが分かる。

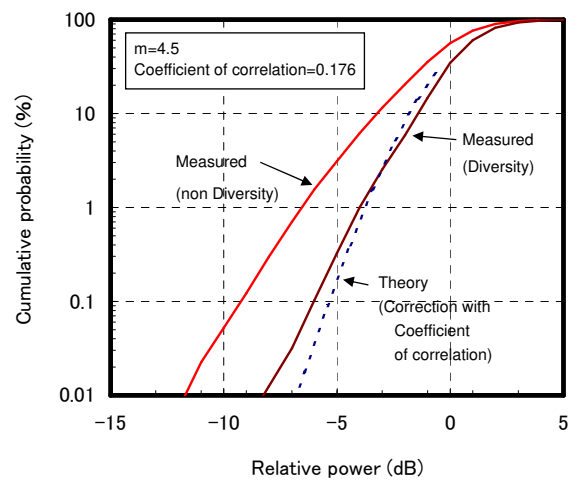
また、相関係数で補正された理論ダイバーシチ分布特性と実測ダイバーシチ分布特性は一致する結果が示されており、累積確率0.01%値において、ダイバーシチの改善効果は、3.0dB~5.0dB程度得られる結果となっている。

このことから、室内伝搬において1λ程度のアンテナ間隔が確保されていれば、所要のダイバーシチ効果は充分期待でき、そのダイバーシチ改善効果を推定するには、(1)式と(5)式は有用であると考えられる。

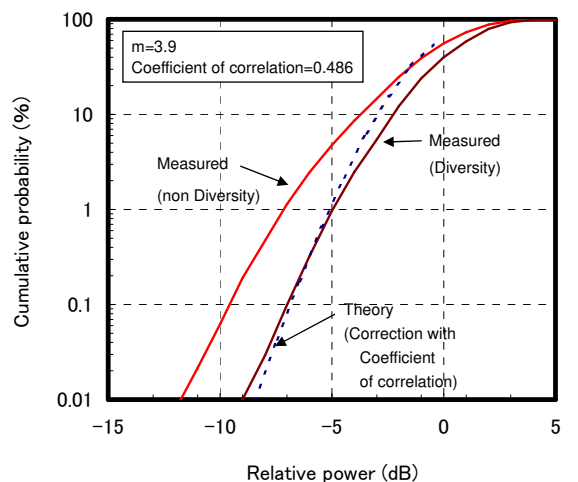
なお、図6(c)において相対受信電力値の大きい



(a) Measured No.1



(b) Measured No.4



(c) Measured No.9

図6 実測ダイバーシチ特性と理論ダイバーシチ特性による受信電力累積分布の比較

Fig.6 Comparisons of CDF for measured diversity curve and theoretical diversity curve.

領域で誤差が生じているのは、(5)式の適用領域外であるため、相関係数の補正量誤差が大きくなったためと考えられる。

4. むすび

本論文では5.2GHz帯高速無線LANにおける、室内伝搬のダイバーシチ特性について明らかにした。最初に、広帯域伝送における室内伝搬のフェージング特性は仲上m分布でよく近似され、アンテナ間隔 1λ でのブランチ出力は同一の平均受信電力となることを示した。

また、ブランチ出力間の電力相関特性は、アンテナ間隔を広げて行くにつれて、相関係数は小さくなる傾向を示し、アンテナ間隔を 1.5λ 以上を確保できていれば、ほぼ無相関に近づけられることが確認された。

最後に、室内伝搬でのダイバーシチ改善効果は理論特性と実測特性がよく一致することを示した。このことから、理論式からダイバーシチ改善効果を推定することが可能であり、室内伝搬においても 1λ 程度のアンテナ間隔が確保されていれば、所要のダイバーシチ効果は得られることが分かった。

今後は、本研究で得られた結果を無線LANのアクセスポイントなど置局配置の回線設計法へ反映して行く予定である。

文 献

- [1] 佐々木範雄, 花海 丞, 安達文幸, “2.4GHz帯広帯域伝送における室内電波伝搬特性,” 電学通信研究会, CMN-01-9, pp. 43-49, 2001・1.
- [2] 佐々木範雄, 工藤貴之, 花海 丞, 清野賢一, 安達文幸, “5GHz帯室内伝搬における変動特性,” 2002 信学全大, B-5-107, 2002.
- [3] 佐々木範雄, 花海 丞, 工藤貴之, 安達文幸, “室内における5.2GHz帯の電波伝搬特性,” 2003 電学全大, 3-006, 2003.
- [4] 細谷良雄他, “電波伝搬ハンドブック,” ㈱リアライズ社.