

次世代移動通信の実現に向けたDS-CDMA伝送実験

将来の移動無線アクセスとして注目されている直接拡散符号分割多元接続(DS-CDMA)について、同期検波RAKE合成や適応送信電力制御の効果を測定し、DS-CDMAがマルチパスフェージングを効果的に利用できる無線アクセス方式であることを実験的に明らかにした。

あだち ふみゆき おおの こうじ ひがし あきひろ どひ ともひろ おくむら ゆきひこ
安達 文幸・大野 公士・東 明洋・土肥 智弘・奥村 幸彦

まえがき

DS-CDMAは次世代移動通信における無線アクセスの有力候補として注目を集めている^{1)~5)}(最近の技術動向に関する総合的な解説論文として文献[4]を参照)。米国では、1.25MHz帯域のDS-CDMAがIS-95としてすでに標準化されている⁶⁾。DS-CDMAを伝送技術上の特徴としてまとめてみると以下のようになろう。

- ・拡散帯域幅を広くすれば受信波を複数のパスに分解できる。複数パスをRAKE(熊手の意味)受信することにより、周波数分割多元接続(FDMA)や時分割多元接続(TDMA)では劣化要因であったフェージングを逆に利用できる(日本のPDC、欧州GSMや北米IS-54はTDMA/FDMAを採用)。
- ・同一搬送波周波数をすべての無線基地局で用いることができる。このため、TDMAでは実現が困難であったサイトダイバーシチが実現でき(この方法はソフトあるいはダイバーシチ・ハンドオーバーと言われている¹⁾)、高品質伝送が可能となる。
- ・音声/データの瞬時的な有無に応じて送信を断続させることにより、他ユーザに与える干渉を低減できる。無線ゾーンのセクタ化によって他ユーザから受ける干渉を低減できるので、FDMAやTDMAに比較して容量増を実現しやすい。

以上のほかに、様々な伝送レートの信号を柔軟に伝送できること、周波数管理がほぼ不要になること、送信電力制御を

工夫すれば基地局配置の自由度を高くできることなど、サービス提供の柔軟性とシステム展開に優れた無線アクセス方式となる可能性がある。

当社では、DS-CDMAの移動通信への適用可能性を探るために伝送実験を進めている⁷⁾⁸⁾。本稿では、同期検波RAKEおよび送信電力制御などの伝送技術に焦点を絞り、これまで得られた実験結果を報告する。

DS-CDMAの概要

DS-CDMA方式の送受信系の基本構成を図1に示す。FDMA方式では、狭帯域変調信号(例えば4相位相変調(QPSK))をユーザに割り当てられた無線周波数に変換して送信する。TDMAでは時間と周波数が各ユーザに割り当てられる。一方、DS-CDMAでは全ユーザが

同一の無線周波数を共有し、各ユーザには異なる拡散符号系列が割り当てられる。狭帯域変調信号(帯域幅=bHz)に拡散符号系列を乗積することによって広帯域無線信号(帯域幅=BHz; $B \gg b$)へと帯域拡散して送信する。拡散符号系列の伝送速度をチップレートと呼ぶ。チップレートと送信データのビットレートとの比が拡散利得pgである。

送信波は建物などで反射されて到達時間の異なる複数の伝播路(パス)を経て受信される。受信機では、送信と同じ拡散符号系列と受信信号との相関演算(逆拡散)により、遅延時間の異なる複数パスの信号に分離してRAKE合成(すべてのパスの信号を同相にして合成)し、データ復調する。逆拡散の過程で希望信号はもとの狭帯域の信号に変換されるが、他ユーザ信号(干渉)や熱雑音は広帯域信号のまま保存されるので、狭帯域フィ

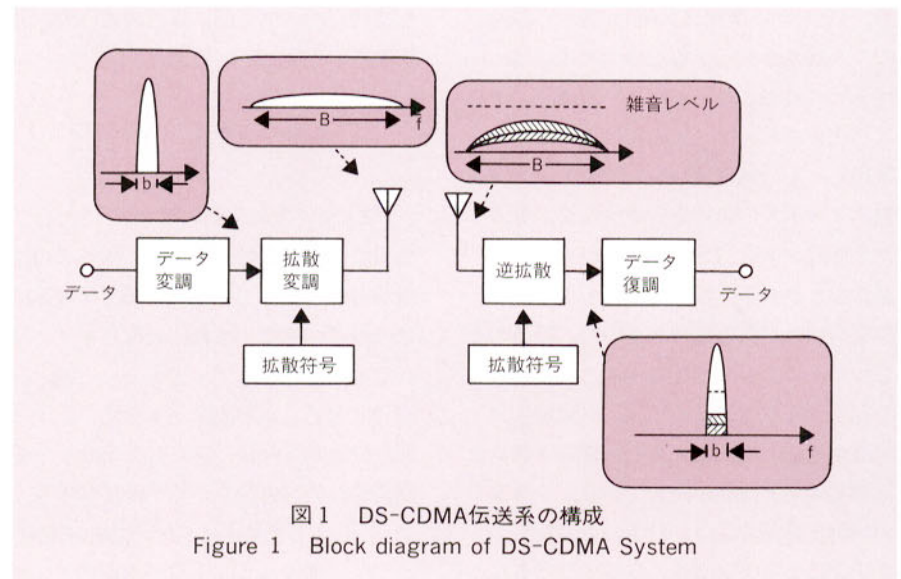


図1 DS-CDMA伝送系の構成

Figure 1 Block diagram of DS-CDMA System

ルタで希望信号を取り出すことができる。このようにして、相互相関と自己相関に優れた拡散符号系列を用いることによって、広い無線帯域を複数ユーザで共有できることになる。拡散符号系列としてウォルシュ符号や直交ゴールド符号¹⁴⁾が知られている³⁾⁴⁾。

ところで、移動通信では各ユーザは基地局からそれぞれ異なった距離で通信するため、同じ送信電力で送信すると基地局での受信レベルが異なってしまう。このとき、受信レベルの低いユーザの信号は品質が劣化してしまう。これはDS-SS-CDMAの遠近問題として知られている。これを避けるため、上りリンクでは全ユーザの受信信号電力が等しくなるようにきめ細かく送信電力を制御することが必須となる。

室内伝送実験

(1) 伝送実験系の構成

無線系諸元を表1に示す。チップレート(あるいは拡散帯域幅)に比例してパス分解能が高くなり、RAKE受信による特性改善が大きくなる。そこで拡散帯域が伝送特性に与える影響を測定するため、5種のチップレート(0.96~15.36 Mcps)を用いている。拡散符号系列は直交ゴールド符号系列と長周期ゴールド符号系列の組合せである。直交ゴールド符号系列1個あたりの情報伝送速度は32kb/sで、32kb/s以上のデータ伝送時には複数の直交ゴールド符号系列をパラレルに用いるマルチコード方式を採用している。32kb/s伝送の拡散利得は $pg=192$ (7.68 Mcpsのとき)であるが、この一部を符号化率 $1/3$ の最良畳み込み符号¹⁵⁾に割り振っている(従って、厳密な意味での拡散利得は64)。

1フレーム長は10msで、これを8ブロックに分割し、それぞれ独立に送信電力制御する構成とした。送信電力制御周期は $T_{tpc}=1.25$ msである。データ変調には4相位相変調(QPSK)、復調にはパイロット絶対同期検波⁹⁾を適用した¹⁰⁾。図2に示すように、周期 $T_{pil}=1.25$ msごとに2

表1 無線系の諸元
Table 1 Radio Link Parameters

チップレート	0.96/1.92/3.84/7.68/15.36 Mcps	
帯域幅	1.25/2.5/5/10/20 MHz	
帯域制限	ルートナイキスト (ロールオフ=0.3)	
拡散符号系列	短符号	128チップ周期の直交ゴールド系列 (7.68 Mcps時)
	長符号	$2^{33}-1$ チップ周期のゴールド系列
変復調	データ	QPSK, パイロット絶対同期検波
	拡散	BPSK
誤り訂正	符号化率 $1/3$ の畳み込み符号化 (拘束長=7) ビタビ復号	
ダイバーシチ	4パス合成RAKE+スペース・ダイバーシチ	
送信電力制御	SIR測定に基づく閉ループ制御+開ループ制御	

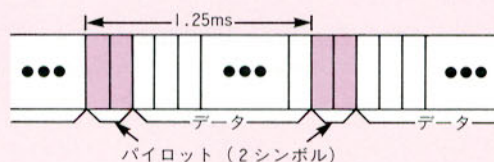


図2 パイロットの挿入

Figure 2 Pilot Symbol Insertion

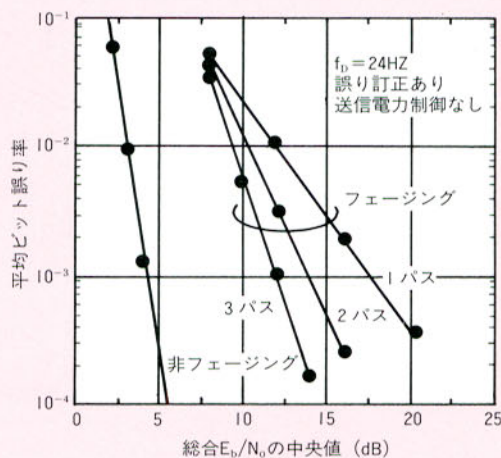


図3 誤り率特性

Figure 3 Measured BER Performance

シンボルのパイロットシンボルを挿入し(従って、 $T_{pil}=T_{tpc}$)、同期検波用の参照信号を1次内挿補間で推定している。特性比較のため、遅延検波も用いた。

(2) 誤り率特性

フェージングシミュレータを用いた伝送実験により誤り率を測定した。フェージングシミュレータは等平均電力のLパス・レイリーフェージングを発生する(Lは分

解可能なパス数)。図3はパス数をパラメータとした誤り率特性の実測結果である。横軸は全パス分を合わせた総合の受信信号電力対雑音(+干渉)電力比(E_b/N_0)である。パス間の遅延は3チップ(1チップ=約 $0.13\mu s$)とした。ビット誤り率0.1%を確保する所要 E_b/N_0 を、1パス時に比較して2パスでは3.5dB低減、3パスではさらに2dB低減できる。このよ

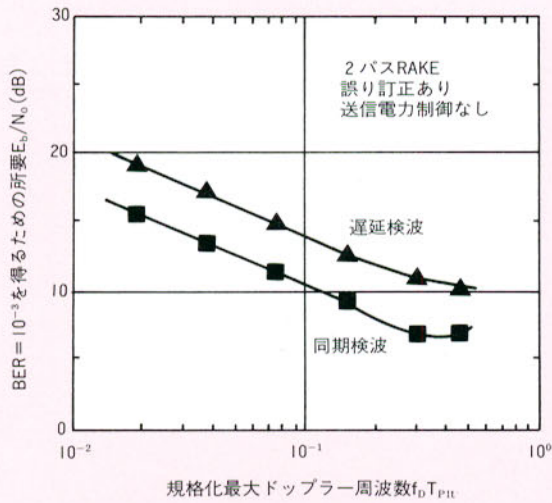


図4 遅延検波と同期検波の比較

Figure 4 Performance Comparison between Coherent Detection and Differential Detection

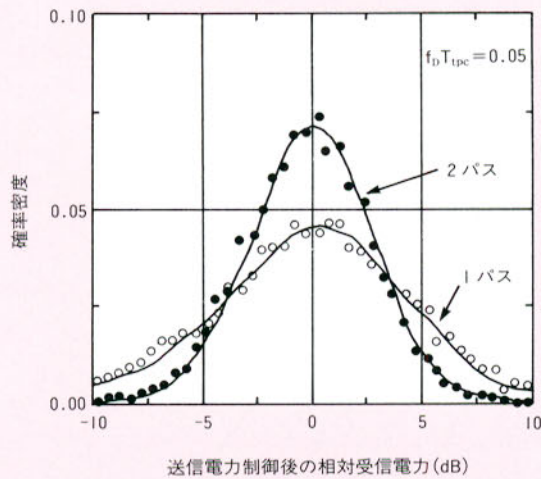


図5 受信電力の分布

Figure 5 Received Signal Power Distribution with Transmit Power Control

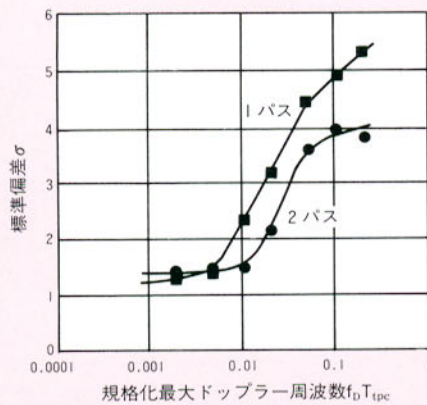


図6 送信電力制御の誤差

Figure 6 Transmit Power Control Error

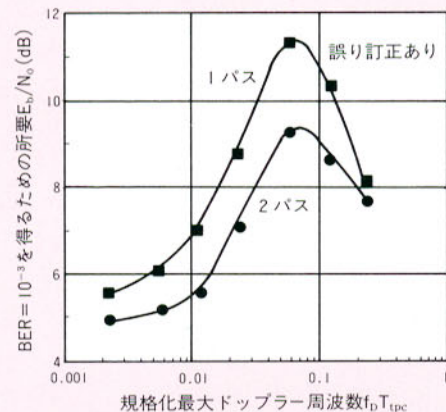


図7 送信電力制御時の所要Eb/N0対最大ドップラー周波数

Figure 7 Received E_b/N_0 Versus Maximum Doppler Frequency with Transmit Power Control

うに、パス数の増加につれて特性が大幅に改善することがわかる。

パイロット絶対同期検波と遅延検波との特性比較を図4に示す。2パスRAKE受信を行った、 $f_D T_{pit}=0.1$ のとき、遅延検波より約3dB優れた特性が得られている。これはほぼ理論値に近い。遅延検波時の特性劣化は、雑音で擾乱された受信信号を検波用の参照信号としていることと差動符号化のためである。

(3) 送信電力制御

遠近問題を避けるため、全ユーザの受信 E_b/N_0 がターゲット値になるように、基地局は各移動局の送信電力を閉ループ制御する。 N_0 を熱雑音電力と干渉電力の和とすれば、トラヒックの変動に適応した送信電力制御が実現できるので、必要最低限の送信電力での通信が可能である¹¹⁾¹²⁾。受信電力分布の測定結果を図5に示す。対数表示した受信電力はターゲット値を中心にほぼ正規分布していることがわかる。標準偏差とフェージングの最大ドップラー周波数 $f_D T_{tpc}$ との関係を測定した結果を図6に示す(横軸は制御周期で正規化した)。送信電力制御に遅延(制御周期の約2倍)があるために、フェージングが高速になるにつれ、制御誤差が増加している。1パス受信時には $f_D T_{tpc}=0.1$ 程度で送信電力制御の効果が失われてレイリーフェージング時の標準偏差5.57dBに近づくが、2パス受信時の制御誤差は最大でも4dBである。この理由は、RAKE受信後の受信電力がレイリーフェ

ージング時より変動幅の狭い、自由度2Lのカイ2乗分布に変換されるからである。

送信電力制御ブロックごと(1.25ms)の制御誤差はほぼ独立とみなせるから、拡散の一部に誤り訂正符号化を用いるときは、制御誤差の多いことがそのまま誤り率の増加にはつながらず、すなわち、よく知られているビットあるいはシンボルインタリーブ効果が期待できる。図7に誤り訂正と組み合わせたときの0.1%ビット誤り率を確保するのに必要な所要 E_b/N_0 を示す。図3と比較すれば、送信電力制御を行わないときに比較して大幅に特性が改善されていることがわかる。このように、送信電力制御と誤り訂正符号化とは補完的な役割を担っていることがわかる(このことは文献[6]でも指摘されている)。

野外伝送実験

東京近郊でDS-CDMA伝送実験を進めている。基地局アンテナ高は地上約59mで、基地局から0.45~1.3kmの距離にある道路に沿って時速約40kmで走行した。図8は移動局側の測定の様子である。走行コースは高速道路脇や住宅街、工場地域を通過する一般道路で、伝搬路の遅延スプレッドは約 $1\mu\text{s}$ である。7.68Mcpsにおける相関出力(逆拡散信号)の観測例を図9に示す。7パスが観測されている。実験に用いたRAKE合成器では主なパスを中心として観測窓(1,2および4チップ)を設け、窓内のパスを同期検波合成している。RAKE合成時の誤り率特性(誤り訂正なし)の測定結果を観測窓をパラメータとして図10に示す。実伝搬環境下でのRAKE受信効果が確認された。

むすび

DS-CDMAについて同期検波RAKE受信および送信電力制御に関する実験結果について述べた。従来より指摘されていたことではあるが、移動通信では分離パスを多くとれる広帯域DS-CDMAが伝



図8 測定車
Figure 8 Measuring Van

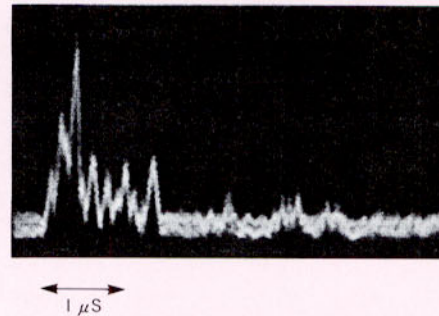


図9 相関器出力
Figure 9 Example of Correlator Output

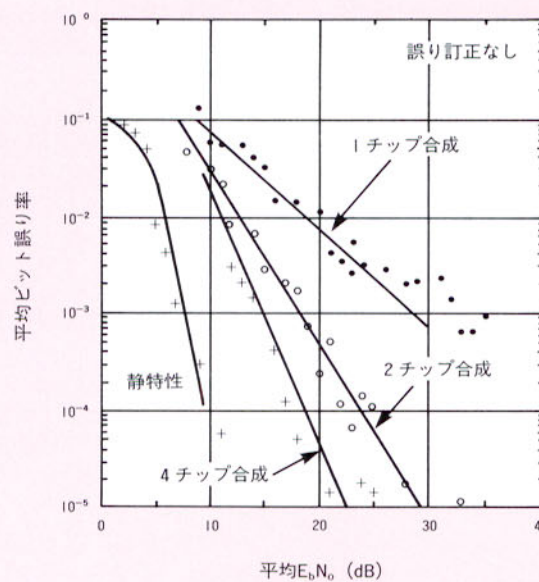


図10 誤り率特性(野外)
Figure 10 Measured BER Performance (Field Test Data)

送特性向上の観点から適していることを実験により示した。現在、東京近郊で3基地局、7移動局を用いた野外実験を進めている。実験では、高品質音声(8,32kb/s)/FAX/動画像(~384kb/s)伝

送実験のほか、ダイバーシチハンドオフ(セクタ間,セル間)などの制御実験を行う予定であり、これらの実験結果については稿を改めて報告したい。

文 献

- 1) K.S. Gilhousen, I.M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L.A. Weaver and III. C.E. Wheatley: "On the capacity of a cellular CDMA system", IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. VT-40, pp.303-312 (1991)
- 2) A.J. Viterbi and A.M. Viterbi: "Erlang capacity of a power controlled CDMA system", IEEE J. Sel. Areas Commun., Vol. SAC-11, pp.892-900(1993)
- 3) A. Baier, U.-C. Fiebig, W. Granzow, W. Koch, P. Teder, and J. Thielecke: "Design study for a CDMA-based third-generation mobile radio system", IEEE J. Sel. Areas Commun., Vol. SAC-12, pp.733-743 (1994)
- 4) R.Kohno, R.Meidan and B. Milstain:"Spread spectrum access methods for wireless communications", IEEE Commun. Mag., Vol. 33, pp.58-67 (1995)
- 5) P. Newson and M.R. Heath: "The Capacity of a spread spectrum CDMA system for cellular mobile radio with consideration of system imperfections", IEEE J. Sel. Areas Commun., Vol. SAC-12, pp.673-684 (1994)
- 6) R.Padovani: "Reverse link performance of IS-95 based cellular systems", IEEE Personal Communications, pp. 28-34, 3rd Quarter (1994)
- 7) F.Adachi, K. Ohno, M. Sawahashi and A. Higashi: "Multimedia mobile radio access based on coherent DS-CDMA", Proc. 2nd International workshop on Mobile Multi-media Commun., A2.3, Bristol University, U.K. (1995)
- 8) K. Ohno, M. Sawahashi and F. Adachi:"Wideband coherent DS-CDMA", Proc. IEEE VTC, pp. 779-783, Chicago, U.S.A. (1995)
- 9) 三瓶:"陸上移動通信用16QAMのフェージングひずみ補償方式",信学論B-II, J-72-B-II, pp.7-15(1989)
- 10) 東, 大野: "DS-CDMAにおける内挿型同期検波RAKEのパス/スペースダイバースチ複合効果", 1995年春季信学全大, B-410
- 11) 土肥, 佐和橋: "DS/CDMAにおける干渉電力を用いる送信電力制御", 信学技報, RCS94-99, pp.63-68(1994)
- 12) T.Suzuki, et al.: "Microcell quality control scheme for PCS CDMA systems considering non-uniform traffic distribution", Proc. IEEE ICUPC'93, pp.239-243(1993)
- 13) 喜安:"Hadamard行列とその応用",電子情報通信学会誌. Vol.57, No.1.1974
- 14) 朱近, 太刀川, 丸林:"二値の非線形拡散系列について", 信学技報, IT90-7, pp37-42(1990)
- 15) S. Lin and D.J. Costello Jr. : "Error control coding: Fundamentals and Applications", Prentice-Hall (1983)