

周波数領域繰り返し PIC を用いる DS-CDMA MIMO 多重におけるスループット特性

中島 昭範[†], ガーグ ディープシカ[†], 安達 文幸[‡]

東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻
〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: [†]{nakajima, deep}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp [‡]adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 最近, 限られた帯域幅での高速伝送技術としてマルチ送受信アンテナ(MIMO)多重が注目されている. しかし, 周波数選択性フェージングチャネルでは, マルチコード DS-CDMA 伝送を用いると直交拡散符号間の直交性の崩れにより伝送特性が大幅に劣化してしまう. 筆者らはこれまで, マルチコード DS-CDMA MIMO 多重伝送を対象として周波数領域等化と減算型並列干渉キャンセル (PIC) 操作を繰り返すことで信号分離と共に周波数ダイバーシチ効果とアンテナダイバーシチ効果を得ることができる周波数領域繰り返し PIC を提案し, その伝送特性改善効果を明らかにした. ところで, 今後の移動通信ではパケット伝送が主流になることが予想され, 誤り訂正符号化と自動再送 (ARQ) とを組み合わせたハイブリッド ARQ (HARQ) が重要な技術になる. そこで本論文では, マルチコード DS-CDMA MIMO 多重に周波数領域繰り返し PIC を適用したときの HARQ のスループット特性を計算機シミュレーションにより明らかにしている.

キーワード マルチコード DS-CDMA, MIMO 多重, 周波数領域繰り返し PIC, Hybrid ARQ, 移動通信

Throughput performance of DS-CDMA MIMO multiplexing with frequency-domain iterative PIC

Akinori NAKAJIMA[†] Deepshikha GARG[†] and Fumiyuki ADACHI[‡]

Dept. of Electrical and Communication Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University
6-6-05 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579 Japan

E-mail: [†]{nakajima, deep}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, [‡]adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract Recently, multi-input multi-output (MIMO) multiplexing is gaining much attention for achieving very high speed data communications with limited bandwidth. However, in a frequency-selective fading channel, the performance of multicode DS-CDMA transmission significantly degrades due to distortion of the orthogonality among orthogonal spreading codes. We have proposed a frequency-domain iterative parallel interference cancellation (PIC), that performs frequency-domain equalization and PIC in an iterative fashion, for separating the signals transmitted from different antennas while achieving the frequency diversity gain and antenna diversity effect and evaluated its performance improvement in multicode DS-CDMA MIMO multiplexing. Broadband wireless packet access will be the core technology of the next generation mobile communications systems. For packet transmission, turbo coded hybrid ARQ (HARQ) is one of the promising error control technique. In this paper, the throughput performance of HARQ in multicode-DS-CDMA MIMO multiplexing with frequency-domain iterative PIC is evaluated by computer simulation.

Keyword multicode DS-CDMA, MIMO multiplexing, frequency-domain iterative PIC, Hybrid ARQ, mobile radio

1. まえがき

次世代の移動通信システムでは, 多様なブロードバンドマルチメディア情報の提供が期待されており, 超高速無線伝送技術の実現が望まれている[1]. しかし, 利用できる無線帯域幅が限られているため, 周波数利用効率の高い無線伝送技術の開発が必要である. 有望な技術として知られているものに, マルチ送受信アンテナ(MIMO: Multi-Input Multi-Output)多重[2-4]がある. MIMO 多重では, 送信データ系列を複数の並列系列に変換し, それぞれを異なる送信アンテナから同一の搬送波周波数を用いて同時送信する. 受信機では, 重畳された信号を分離した後, 復調を行う. 信号を分離する代表的な方法として, 最尤判定(MLD)[5], 最小平均二乗誤差 (MMSE)[5] や Vertical-bell

laboratories layered space-time architecture (V-BLAST) [4]などが知られている.

ところで, 移動無線チャネルは遅延時間の異なる多数の独立パスから構成されている. このようなチャネルは周波数選択性チャネルと呼ばれ, シングルキャリア(SC)伝送では厳しい符号間干渉により伝送特性が大幅に劣化してしまう[5,6]. そこで, 最近では, 直交周波数分割多重(OFDM)[7]やマルチキャリア符号分割多元接続(MC-CDMA)[8]といったマルチキャリア伝送が注目されるようになった. 最近では, 周波数領域等化 (FDE: Frequency-domain Equalization)[9,10]を用いる SC 伝送も注目されている. 筆者らはスペクトル拡散を用いる SC すなわち DS-CDMA における FDE の研究を進めており, FDE を用いる DS-CDMA は

MC-CDMA と同等の特性を得ることができることを報告してきた[11]. これまで筆者らは, DS-CDMA MIMO 多重伝送を対象として, 周波数領域における繰り返し PIC を検討し, 周波数領域繰り返し PIC を提案した[12-14]. MLD は最も優れた信号分離精度を有するものの, 送受信アンテナ数と変調多値数に加え, 時間領域においてはパス数が, 周波数領域においては, 送信フレーム内のシンボル数がパラメータとなり, 演算量が指数関数的に増大してしまう. MMSE[5]は MLD[5]に比べ, 演算量は小さいが信号分離精度は悪い. 一方, 周波数領域繰り返し PIC は, 周波数領域等化と PIC 操作を繰り返すことで信号分離と共に周波数ダイバーシチ効果とアンテナダイバーシチ効果を得ることができる.

ところで, 今後の移動通信ではパケット伝送が主流になると予想される. 周波数選択性フェージングチャネル環境下でのパケット伝送では, 何らかの強力な誤り制御技術が必要である. その有効な技術の 1 つにターボ符号化ハイブリッド自動再送(HARQ: Hybrid automatic repeat request)が知られている. Rate compatible turbo coded (RCPT) HARQ[15]はパリティビットを減らして送信することで, スループットを向上させる技術である. これまで, DS-CDMA や OFDM を対象に RCPT HARQ の検討が行われている[16,17]. しかし, マルチコード DS-CDMA MIMO 多重伝送における RCPT HARQ のスループット特性はまだ明らかにされていない. そこで, 本論文では, 周波数領域繰り返し PIC をマルチコード DS-CDMA MIMO 多重伝送に適用したときの RCPT HARQ のスループット特性を計算機シミュレーションによって求め, 繰り返し効果や拡散率の影響について明らかにしている.

本論文の構成は以下のようになっている. 第 2 章では, マルチコード DS-CDMA における周波数領域繰り返し PIC を用いる MIMO 多重伝送系と RCPT HARQ について述べている. 第 3 章では, 計算機シミュレーションにより求めた周波数選択性レイリーフェージングチャネルにおける RCPT HARQ のスループット特性を求め, 繰り返し効果や拡散率の影響について考察している. 第 4 章はむすびである.

2. 周波数領域繰り返し PIC を用いるマルチコード DS-CDMA MIMO 多重伝送系

2.1. 送信信号と受信信号

図 1 は送信アンテナ N_t 本, 受信アンテナ N_r 本を用いるマルチコード DS-CDMA (N_t, N_r)MIMO 多重伝送系の構成である. 本論文では, チップ時刻毎の離散表現を用いる. 一般性を失うことなく, N_t 個の送信アンテナよりそれぞれ N_c チップの DS-CDMA データチップブロックを送信するものとする. コード多重数を C , 拡散率を SF とするとき, 各送信アンテナから送信するシンボル数は $C \cdot N_c / SF$ シンボルである.

送信機では, まず CRC 符号化した 2 値情報ビット系列を RCPT 符号化し, パンクチャを行って得られた送信ビット系列を再送のためにバッファに溜め込む. その後, ブロックインターバによってビット系列の順序を交錯し, その 2 値送信ビット系列を $N_t C \cdot N_c / SF$ 個のデータシンボル系列 $\{d(n')\}; n'=0 \sim (N_t C \cdot N_c / SF - 1)$ に変換する(なお, 本論文では QPSK 変調を用いている). 次に, データシンボル系列を長さ $N_t N_c / SF$ シンボルの C 個の並列系列 $\{d_c(n)\}; c=0 \sim (C-1), n=0 \sim (N_t N_c / SF - 1)$ に直並列(S/P: Serial-to-Parallel)変換して, それぞれを C 個の拡散率 SF の直交拡散符号を用いて拡散した上でコード多重するマルチコード拡散(multicode spreading)を行う. その後, マルチコード拡散信号を雑音化するためにスクランブル符号を乗算(scrambling)する. マルチコード拡散とスクランプリングによって得られたチップ系列 $s(t')$ は次式のように表わせる.

$$s(t') = \left[\sum_{c=0}^{C-1} d_c(\lfloor t'/SF \rfloor) c_c(t' \bmod SF) \right] c_{scr}(t') \quad (1)$$

ここで, $c_c(t')$ ($t'=0 \sim (N_t N_c - 1), c=0 \sim (C-1)$) は第 c 番目の直交拡散符号であり, $c_{scr}(t')$ はスクランブル符号である.

このようにして生成されたマルチコードチップ系列 $s(t')$ を送信アンテナと同数(すなわち N_t 個)の並列チップ系列 $\{s_{n_t}(t); n_t=0 \sim (N_t - 1), t=0 \sim (N_c - 1)\}$ に S/P 変換する. 各送信系列を N_c 個のチップからなるチップブロックに分割したのち, 各ブロックの後尾 N_g 個のチップをコピーしてブロックの先頭

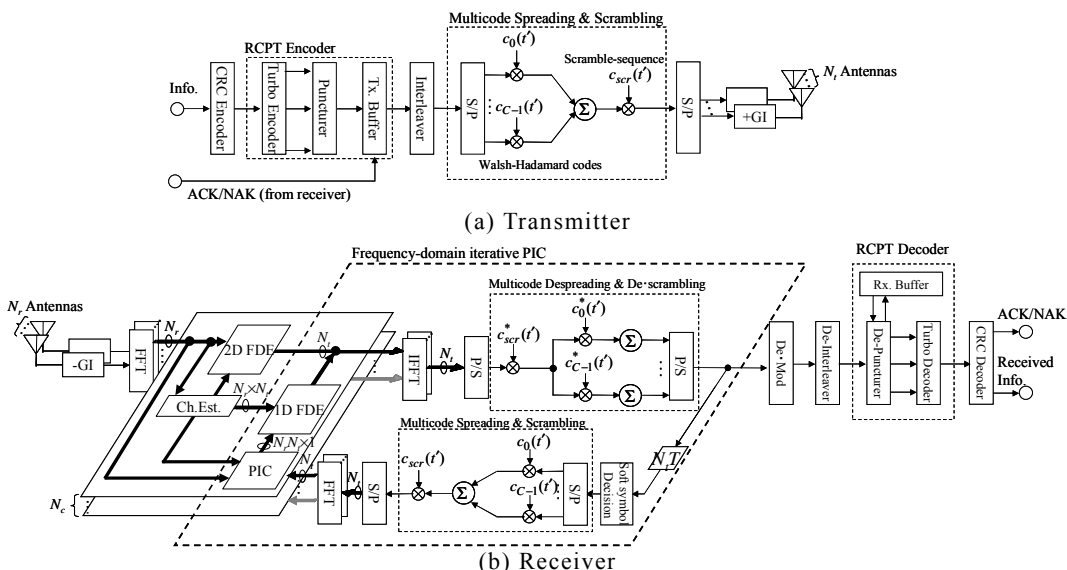


図 1 周波数領域繰り返し PIC を用いるマルチコード DS-CDMA (N_t, N_r)MIMO 多重伝送系

のガードインターバル(GI)に挿入してチップフレームを生成する。図 2 に GI 挿入後のフレーム構成を示す。生成された N_t 個の並列チップフレーム系列を、各々の送信アンテナから同一搬送波周波数を用いて同時送信する。本論文では各アンテナから同時送信される N_t 個の信号をベクトル表現を用いて表す。時刻 t におけるチップ系列ベクトル $\tilde{\mathbf{s}}(t)=[\tilde{s}_0(t), \dots, \tilde{s}_{N_t-1}(t)]^T$, $t=-N_g \sim (N_c-1)$, の等価低域表現は次式で表される。

$$\tilde{\mathbf{s}}(t) = \sqrt{2E_c/T_c} \mathbf{s}(t \bmod N_c) \quad (2)$$

ここで, $\mathbf{s}(t)=[s_0(t), \dots, s_{N_t-1}(t)]^T$, E_c は 1 アンテナ当たりのチップエネルギー, T_c はチップ長である。

N_t 本のアンテナから送信されたチップ信号は, それぞれ遅延時間の異なる L 個の離散パスから構成される周波数選択性フェージングチャネルを伝搬し, N_t 本のアンテナで受信されるものとする。受信機では, 各アンテナの受信チップ系列から GI を取り除いた後に N_c ポイント FFT を適用して, 受信信号を N_c 個の周波数成分に分解する。第 k 周波数における受信信号ベクトル $\mathbf{R}(k)=[R_0(k), \dots, R_{N_t-1}(k)]^T$ は次式で表すことができる。

$$\mathbf{R}(k) = \sqrt{2E_c/T_c} \mathbf{H}(k)\mathbf{S}(k) + \mathbf{\Pi}(k) \quad (3)$$

ここで, $\mathbf{H}(k)$ は第 k 周波数における N_t 行 N_t 列複素チャネル利得行列であり, $\mathbf{S}(k)$ 及び $\mathbf{\Pi}(k)$ はそれぞれ第 k 周波数における N_t 次元信号ベクトル及び N_t 次元雑音ベクトルであり, 次式で与えられる。

$$\begin{cases} \mathbf{H}(k) = \sum_{l=0}^{L-1} \mathbf{h}_l \exp(-j2\pi\tau_l k / N_c) \\ \mathbf{S}(k) = \sum_{t=0}^{N_c-1} \mathbf{s}(t) \exp(-j2\pi k t / N_c) \\ \mathbf{\Pi}(k) = \sum_{t=0}^{N_c-1} \mathbf{n}(t) \exp(-j2\pi k t / N_c) \end{cases} \quad (4)$$

ここで, \mathbf{h}_l は第 l パスにおける N_t 行 N_t 列の複素パス利得行列である。本論文では, ブロックフェージングを仮定し, 1 フレームにわたってパス利得は変動しないものとしている。 τ_l は第 l パスの遅延時間である。また, $\mathbf{n}(t)=[n_0(t), \dots, n_{N_t-1}(t)]^T$ は各受信アンテナにおける加法性白色ガウス雑音(AWGN)ベクトルである。各受信アンテナにおける AWGN は独立で, 平均 0, 分散 $2\sigma^2=2N_0/T_c$ である。ここで, N_0 は AWGN の片側電力スペクトル密度である。

受信機では, 多重された信号を分離するために, 周波数領域受信信号ベクトルに対し 2 次元周波数領域等化(2D-FDE)を適用する。しかし, 2D-FDE では, パス間干渉と他の送信信号が与える干渉に対して同時に抑圧を行うため, 信号分離精度が悪い。そのため, 周波数領域繰り返し PIC[14]を用いて繰り返し処理を行う。周波数領域繰り返し PIC では, 等化後の周波数領域信号を時間領域に変換し, 軟判定を行う。その後, 軟判定シンボル系列を用いて送信フレームレプリカを生成し, 周波数領域干渉キャンセルを行

う。そして, シングルアンテナ送信時の等化重みを用いて 1D-FDE を行う。以上の操作を繰り返している。繰り返し処理が終了した時点で, 復調とデ・インタリーブを行い, RCPT 復号器に入力する。RCPT 復号器では, デ・パンクチャとバッファリング, ターボ復号を行っている。ターボ復号器で復号を行った後, 受信情報ビット系列を出力し, 誤り検出を行い, ACK/NACK コマンドを送信機に伝送する。

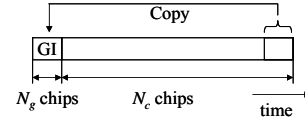


図 2 チップフレーム構成

2.2. RCPT HARQ

図 3 は RCPT HARQ の送信パケット生成を示したものである。本論文では, 符号化率 $R=1/3$ のターボ符号器を用いている。ターボ符号器から出力される系列長 K のシステムチックビット(情報ビット)系列と, それと同じ長さの 2 つのパリティビット系列を用いて送信ビット系列を生成する。本論文では RCPT HARQ Type II S-P2 を用いる[16]。図 4 は RCPT HARQ Type II S-P2 における再送と受信信号処理を示している。以下にその詳細を述べる。

最初はシステムチックビット系列で構成されたパケットを送信する。受信側では, 受信したパケットに対して誤り検出を行う。誤りが検出されない場合には, ACK コマンドを送信する。一方, 誤りがある場合, 受信機は NACK コマンドを送信する。送信機は, NACK コマンドを受信した後, 再送を行う。このときに送信されるパケットは, パンクチャリング周期 $P=2$ でパンクチャして得られる 2 つのパリティビット系列のうち一方で構成される。パンクチャリングパターンを以下に示す。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

受信機では, 再送されたパケットを受信し, パリティビット系列に対してデ・パンクチャリングを行う。また, 送られていないパリティビットの軟判定値を 0 とする。デ・パンクチャリングによって得られた 2 つパリティビット系列と初めに受信したシステムチックビット系列を用いて復号を行う。このとき符号化率は $1/2$ に相当する。それでもなお, 誤りが検出される場合, 他方のパリティビット系列で構成されるパケットを送信する。受信側では, 初めに受信したシステムチックビット系列と, 再送によって受信した全てのパリティビットとを符号合成して復号を行う。このときの符号化率は $1/3$ に相当する。

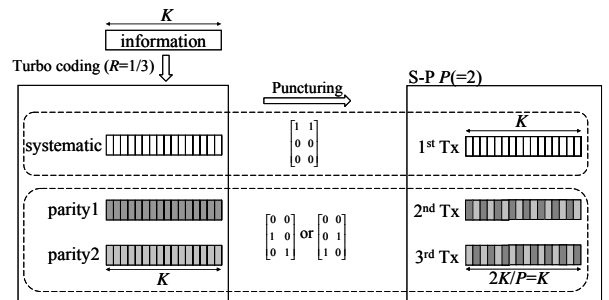


図 3 RCPT HARQ Type II S-P2 送信パケット生成

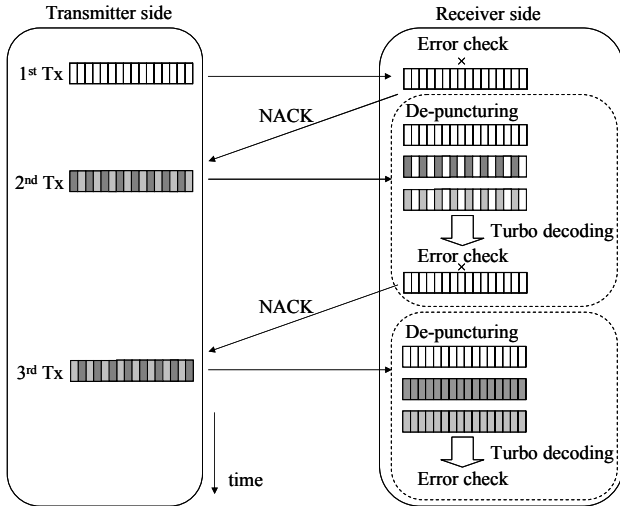


図 4 再送と受信信号処理

3. 計算機シミュレーション

3.1. 計算機シミュレーション諸元

表 1 に計算機シミュレーション諸元を示す。情報系列長 $K=2048$ ビットの系列を送信するものとする。本論文では、(7,5)再帰的システムティック畳み込み(RSC)符号器を 2 個用いた符号化率 $1/3$ のターボ符号化を用いる。また、 64×32 -ビットブロックインターリーブをチャネルインターリーブとして用いている。 $N_t \times N_r$ 個のフェージングチャネルは互いに独立で、各々は指数減衰電力遅延プロファイルを有する $L=16$ 個の独立なパスから構成される周波数選択性のブロックフェージングチャネルとしている。受信機のタイミング再生とチャネル推定は理想的であるものとしている。また、GI 付加後のフレーム長 $T=(N_c+N_g)T_c$ で正規化した最大ドップラ一周波数は $f_D T=0.001$ であるものとした。これは、搬送波周波数 5GHz 、送信チップレート 100Mcps 、移動速度が約 80km/h のときに相当する。

表 1 シミュレーション諸元

Data Modulation		QPSK
Number of Tx, Rx antennas		$N_t=N_r=2,4$
Multicode spreading	Spreading modulation	BPSK
	Spreading factor	$SF=1\sim 256$
	Equivalent Spreading factor	$SF_{eq}=1$
Scramble code	M-sequence with a period of 4095 chips	
Number of FFT points	$N_c=256$	
GI	$N_g=32$	
Channel	$L=16$ -path exponential power delay profile	
	Decay factor $\alpha=0,6\text{dB}$	
Channel estimation	Ideal	

3.2. 繰り返し PIC 効果

図 5 はマルチコード DS-CDMA (N_t, N_r)MIMO 多重におけるスループット特性を 1 受信アンテナあたりの平均受信 E_s/N_0 の関数としてプロットしたものである。ここで、 E_s/N_0 は 1 シンボルあたりのエネルギー対雑音電力スペクトル密度比を表している。送信フレームにはガードが含まれているので、それによるスループットの低下を考慮しなければならない。そのため、

QPSK 変調を用いる場合の最大スループットは $2N_t \cdot N_c / (N_g + N_c) \text{bps/Hz}$ となる。マルチコード伝送時の等価拡散率 SF_{eq} を $SF_{eq}=1$ とした(すなわち、 $SF_{eq}=SF/C$ であり、拡散率を SF_{eq} とするシングルコード伝送時と同じ伝送速度を達成できる)。また、比較のため干渉キャンセルが理想的であるとき(Perfect PIC)とシングルアンテナ送信((1,2)SIMO)におけるスループット特性も示している。図 5 から分かるように、繰り返しを行うことでスループットが向上しているが、繰り返し回数が増えるに従い、得られる改善効果の増分は小さくなる。繰り返し 4 回目で、繰り返し 0 回より最大約 1.9 倍のスループットが得られており、繰り返し 4 回目で理想 PIC にほぼ近いスループットが得られていることが分かる。以降のシミュレーションでは繰り返し回数を 4 回とする。また、繰り返し 4 回で(1,2)SIMOよりも約 1.6~2.0 倍高いスループットが向上していることが分かる。

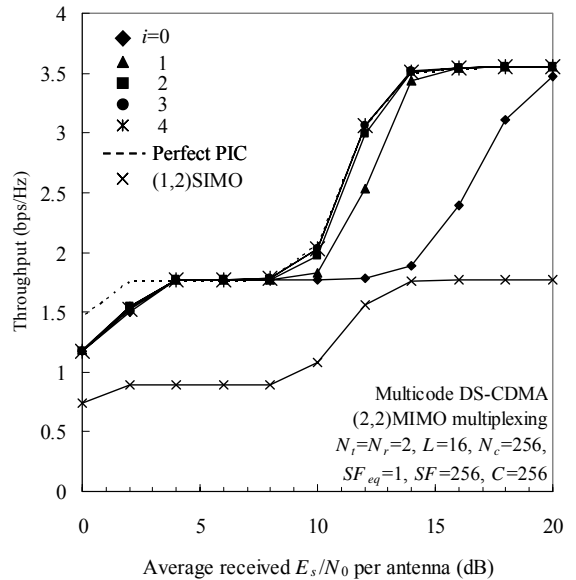


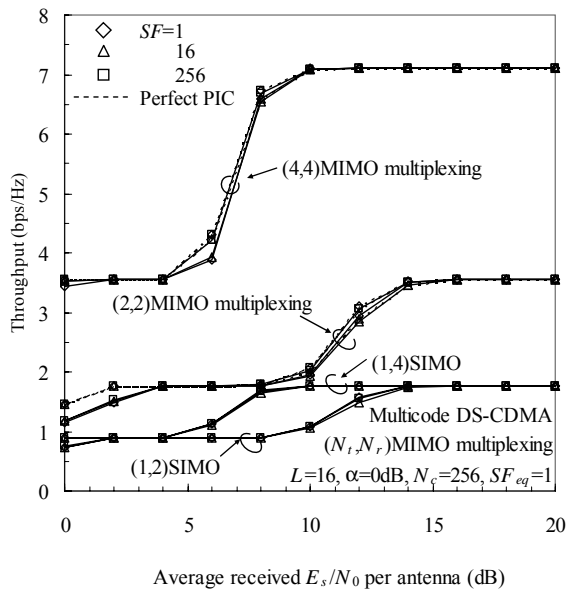
図 5 繰り返し効果

3.3. 拡散率の影響

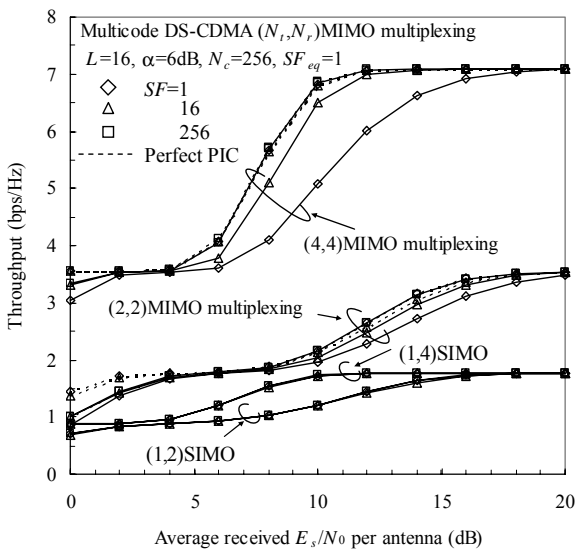
図 6 は減衰指数 $\alpha=0$ 及び 6dB のときのマルチコード DS-CDMA (N_t, N_r)MIMO 多重のスループット特性である。等価拡散率 SF_{eq} を $SF_{eq}=1$ としている。図 6 から分かるように、 $\alpha=0\text{dB}$ (一様電力遅延プロファイル) のときは、 $(N_t, N_r)=(2,2)$ と $(4,4)$ の場合とも、拡散率に依らず理想 PIC の特性に近づいている。一方、 $\alpha=6\text{dB}$ の場合、拡散率が大きいほど理想 PIC により近いスループット特性が得られている。これは、拡散率が大きい場合、逆拡散操作による PIC 後の残留干渉を大きく低減できるからである。 $SF=256(16)$ のときのスループット特性は、 $(N_t, N_r)=(2,2)$ 及び $(4,4)$ の場合、 $SF=1$ のときに比べそれぞれ最大約 1.35(1.28), 1.15(1.08) 倍高いスループットが得られている。 $(4,4)$ のときの方が $(2,2)$ のときよりも $SF=1$ と $SF=256$ の特性差が大きいのは、送信アンテナが多くなると、それに伴って残留干渉も増大するので、 $SF=1$ ではその影響を大きく受けるからである。以上から、拡散率を大きくすることによってスループット特性の周波数選択性への依存性は小さくなることが分かる。

また、(2,2)MIMO 多重と(1,2)SIMO と比べると、 $\alpha=0\text{dB}$ に

おいては拡散率に依らず MIMO 多重の方が約 2.0 倍、(4,4)MIMO 多重のとき(1,4)SIMO に比べ約 3.5~4.0 倍高いスループットが得られていることが分かる。一方、 $\alpha=6\text{dB}$ において、(2,2)MIMO 多重のとき(1,2)SIMO と比べて、ほぼ拡散率に依らず約 1.6~2.0 倍、(4,4)MIMO 多重かつ $SF=1, 16, 256$ のとき、(1,4)SIMO と比べそれぞれ約 2.7~4.0, 3.1~4.0, 3.4~4.0 倍高いスループットが得られていることが分かる。



(a) $\alpha=0\text{dB}$



(b) $\alpha=6\text{dB}$

図 6 拡散率の影響

4. むすび

本論文では、周波数領域等化と減算型並列干渉キャンセル(PIC)操作を繰り返すことで信号分離を行いつつ周波数ダイバーシチ効果とアンテナダイバーシチ効果を

得る周波数領域繰り返し PIC をマルチコード DS-CDMA MIMO 伝送に適用したときの周波数選択性フェージングチャネル環境下における RCPT HARQ のスループット特性を計算機シミュレーションにより明らかにし、等価拡散率を一定としたときの拡散率の影響について考察した。結果をまとめると以下のようになる。

繰り返し回数は 4 回で十分であり、 $(N_t, N_r)=(2, 2)$ かつ $SF=256$ のとき、繰り返しを行わない場合の最大約 1.9 倍のスループット向上が得られることが分かった。周波数選択性が強い場合($\alpha=0\text{dB}$)、拡散率に依らず理想 PIC に近い特性が得られる。しかし、周波数選択性が弱い場合($\alpha=6\text{dB}$)には、拡散率が小さいとき、逆拡散操作による残留干渉の低減効果が小さいので、理想 PIC から大きく劣化する。一方、拡散率が大きくすると、周波数選択性による影響が小さくなることが分かった。

文 献

- [1] F. Adachi, "Wireless past and future-evolving mobile communications systems," IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E84-A, No. 1, pp.55-60, Jan. 2001.
- [2] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," Wireless Personal Commun., Vol.6, No. 3, pp. 311-335, 1998.
- [3] R. Van Nee, A. van Zelst and G. Awater, "Maximum Likelihood Decoding in a Space Division Multiplexing System," Proc. IEEE VTC2000-Spring, vol.1, pp.6-10, May 2000.
- [4] P. W. Wolniansky, et al., "V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," Proc. ISSSE, pp.295-300, Sept. 1998.
- [5] John G. Proakis, *Digital Communications*, 4th edition, McGraw-Hill, 2001.
- [6] W. C. Jakes Jr., Ed., *Microwave mobile communications*, Wiley, New York, 1974.
- [7] R. Van Nee, and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Artech House, 2000.
- [8] S. Hara and R. Prasad, "Overview of Multicarrier CDMA," IEEE Commun. Mag., Vol.35, No.12, pp. 126-133, Dec. 1997.
- [9] D. Falconer, S.L. Ariyavistakul, A. Benyamin-Seeyer, and B. Eidson, "Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems," IEEE Commun. Mag., Vol.40, No. 4, pp. 58-66, April 2002.
- [10] K. Takeda, T. Itagaki, and F. Adachi, "Joint use of frequency-domain equalization and transmit/receive antenna diversity for single-carrier transmissions," IEICE Trans. Commun., Vol. E87-B, No. 7, pp. 1946-1953, July 2004.
- [11] T. Itagaki and F. Adachi, "Joint frequency-domain equalization and antenna diversity combining for orthogonal multicode DS-CDMA signal transmissions in a frequency-selective fading channel," IEICE Trans. Commun., Vol. E87-B, No. 7, pp.1954-1963, July 2004.
- [12] 中島昭範, ガーグ・ディーブシカ, 安達文幸, "シングルキャリア MIMO 多重における Hybrid ARQ のスループット特性," 信学技報, RCS2004-151, pp.91-96, 2004 年 8 月.
- [13] 中島昭範, ガーグ・ディーブシカ, 安達文幸,

“DS-CDMAにおける周波数領域繰返しPICを用いる MIMO 多重の伝送特性,” 信学技報, RCS2004-193, pp.113-118, 2004年10月.

- [14]中島昭範, ガーグ・ディーブシカ, 安達文幸, “周波数領域繰返し PIC を用いるマルチコード DS-CDMA-MIMO 多重伝送における拡散率の影響,” 信学技報, RCS2004-297, pp. 43-,48 2005年1月.
- [15]D. N. Rowitch and L. B. Milstein, “Rate compatible punctured turbo (RCPT) codes in hybrid FEC/ARQ system,” Proc. Comm. Theory Mini-conference of GLOBECOM'97, pp. 55-59, Nov. 1997.
- [16]D. Garg, and F. Adachi, “Rate compatible punctured turbo-coded hybrid ARQ for OFDM in a frequency selective fading channel,” Proc. IEEE VTC2003-Spring, pp.2725-2729, Jeju, Korea, 22-25 April, 2003.
- [17]D. Garg and F. Adachi, “Throughput of RCPT hybrid ARQ for DS-CDMA with diversity reception and rake combining,” Proc. IEEE VTC2003-Spring, pp.2730-2734, Jeju, Korea, 22-25 April, 2003.