

STBC ダイバーシチを用いる協調分散アンテナネットワーク におけるスケジューリングに関する一検討

齋藤 智之 安達 文幸

東北大学 電気通信研究機構 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1
E-mail: saito.tmm@riec.tohoku.ac.jp, adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 第5世代(5G)移動無線システムの実現に向けて筆者らは、マクロセル内に多数の分散アンテナを配置し、それらを協調して利用する分散アンテナ協調伝送(Cooperative distributed antenna transmission, CDAT)を提唱している。筆者らは、CDATを用いたネットワークを対象に任意の数の分散アンテナと2本程度の端末アンテナを用いて大きな空間ダイバーシチ次数を確保できる時空間ブロック符号化(STBC)ダイバーシチの検討を行っている。STBCダイバーシチに加え、マクロセル内に存在する多数のアクティブユーザが公平性を確保しつつ、限られた無線帯域を有効に利用するためにスケジューリング規範(Proportional Fair (PF), Round-robin (RR), Max-C/I)を用いることを検討してきた。筆者らはこれまで、周波数選択性が強くなると、ユーザ毎のリソースブロック内平均チャネル利得にほとんど差がなくなってマルチユーザダイバーシチ利得が低下し、その結果、PFスケジューリングとRRスケジューリングの差が僅かになることを示した。

本報告では、計算機シミュレーションにより、STBCダイバーシチとスケジューリングを用いたときの合計リンク容量、ユーザリンク容量およびJainの公平性指標(FI)との関係性を求め、チャネルの周波数選択性と空間ダイバーシチ次数が各スケジューリングに及ぼす影響について定量的に評価している。その結果、STBCダイバーシチを用いる広帯域移動データ通信ではRRスケジューリングとPFスケジューリングの差は僅かであり、演算量の少ないRRスケジューリングで十分であること、また、大きな空間ダイバーシチ次数を得られるSTBCダイバーシチがリンク容量の改善に効果的であることを明らかにしている。

キーワード 協調分散アンテナ, 時空間ブロック符号化, スケジューリング

Study on Scheduling for Cooperative Distributed Antenna Network Using STBC Diversity

Tomoyuki SAITO and Fumiyuki ADACHI

Research Organization of Electrical Communication, Tohoku University

2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, 980-8577 Japan

E-mail: saito.tmm@riec.tohoku.ac.jp, adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract To realize the fifth generation (5G) mobile communications systems, we proposed cooperative distributed antenna transmission (CDAT). We have been studying space-time block coded (STBC) diversity that can obtain large spatial diversity order while using only one or two terminal antennas. Moreover, we have been studying user scheduling scheme (proportional fair (PF), round-robin (RR), and max-C/I) for CDAT using STBC diversity. We have found in our previous work that as the frequency selectivity of the channel gets stronger, the differences in averaged channel gains among active users is substantially reduced and therefore even the RR scheduling provides the link capacity similar to the PF scheduling.

In this paper, we evaluate the relationship of average sum link capacity, user link capacity, and Jain's fairness index, and discuss the impact of frequency-selective fading channel and spatial diversity order. It is shown that for mobile broadband communications using STBC diversity, the difference of link capacities achievable with PF and RR scheduling schemes becomes small and therefore, simple RR scheduling can be used and furthermore that STBC diversity is more effective to improve the link capacity.

Keywords cooperative distributed antenna transmission, space-time block coding, scheduling

1. まえがき

次世代移動無線通信システムでは、通信エリア全体で広帯域伝送の実現が求められている。しかしながら、広帯域無線チャネルは伝搬損失、シャドウイングおよび周波数選択性フェージングにより伝送品質が著しく

劣化してしまう[1]。これらの問題を克服するために、マクロセル内に多数の分散アンテナを配置し、それらを協調して利用する分散アンテナ協調伝送(Cooperative distributed antenna transmission, CDAT)が近年注目を集めている[2,3]。CDATでは、ユーザ端

末 (UE) 近傍の分散アンテナ (DA) を用いることにより伝搬損失とシャドウィング損失の影響を低減でき、マクロセルエリア全体に亘って優れた伝送品質を達成できる。有望な CDAT の一つに、2 本以上の分散アンテナを用いる時空間ブロック符号化 (STBC) ダイバーシチ [4,5,6]がある。

ところで、マクロセル内に存在する多数のアクティブユーザの公平性を確保しつつ、限られた無線帯域を有効に利用するためにはユーザスケジューリングを行う必要がある。筆者らはこれまで、周波数選択性が強い環境下では、ユーザ毎のリソースブロック内平均チャネル利得に差がなくなることによってマルチユーザダイバーシチ利得が低下し、その結果、PF スケジューリングにより得られるリンク容量の向上利得が低下することを示した[7]。

本稿では、計算機シミュレーションにより、合計リンク容量、ユーザリンク容量と Jain の公平性指標 (FI)[8]との関係を求め、チャネルの周波数選択性と空間ダイバーシチ次数が各スケジューリングに及ぼす影響について定量的に評価している。その結果、STBC ダイバーシチを用いる広帯域移動データ通信では RR スケジューリングと PF スケジューリングの差は僅かであり、演算量の少ない RR スケジューリングで十分であること、また、大きな空間ダイバーシチ次数を得られる STBC ダイバーシチがリンク容量の改善に効果的であることを明らかにしている。

本稿の構成は以下の通りである。第 2 章においてネットワークモデルについて述べ、第 3 章にて伝送系について述べる。第 4 章でマルチユーザスケジューリングの動作原理を示し、第 5 章でチャネルモデルを述べたのち計算機シミュレーション結果を示す。第 6 章で結論を述べる。

2. ネットワークモデル

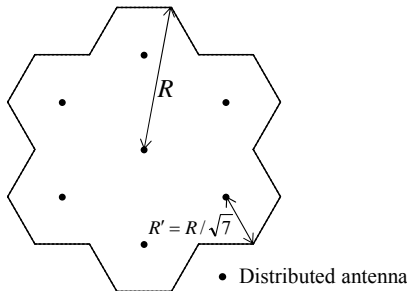


図 1 CDAT を用いたネットワークモデル ($N_{\text{macro}}=7$)

本稿では、周辺マクロセルからの同一チャネル間干渉 (CCI) が存在しないシングルセル環境を仮定する。図 1 にネットワークモデルを示す。CDAT を用いるネットワークでは、ひとつの Macro-BS に有線接続された N_{macro} 本の DA がマクロセル内に一様に配置されており、各 DA は半径 R' の小セルをカバーしている。また、マクロセル半径は R としている。UE は N_{ue} 本のアンテナを搭載しているものとし、各 UE はマクロセル内の N_{macro} 本の DA から N_{mbs} 本の DA を送信ダイバーシチブランチとして選択して、STBC ダイバーシチ OFDM 下りリンク伝送を行う。

3. STBC ダイバーシチを用いる OFDM 下りリンク伝送系

本稿では、FDE を用いるため周波数領域信号表現を用いる。 N_c 本のサブキャリアを用いて伝送するものとする。全周波数帯域を N_c/N_{RB} のサブキャリアからなる N_{RB} 個のリソースブロックに分割し、リソースブロック単位でユーザスケジューリングを行うものと仮定している。以降、スケジューラにて第 $n(n=0\sim N_{\text{RB}}-1)$ リソースブロックに第 u ユーザが割り当てられたものとした伝送系について述べる。

3.1. 送信 FDE を用いる STBC ダイバーシチ

図 2 に、送信 FDE を用いる STBC ダイバーシチの送受信機構成を示す。送信機 (MBS) では、 N_c/N_{RB} 個のデータシンボルからなる J 個の信号ブロックに対して STBC 符号化を適用して $N_{\text{ue}} \times Q$ 行列の STBC 符号化信号行列 $\mathbf{X}(k)$ を生成する。第 n リソースブロックの第 $j(j=0\sim J-1)$ 送信シンボルブロックを $\{D_{n,j}(k); k=n(N_c/N_{\text{RB}})\sim(n+1)(N_c/N_{\text{RB}})-1\}$ とすると、STBC 符号化信号行列 $\mathbf{X}(k)$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{X}(k) = \begin{bmatrix} D_{n,0}(k) & -D_{n,1}^*(k) \\ D_{n,1}(k) & D_{n,0}^*(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

次いで N_{mbs} 行 $\times N_{\text{ue}}$ 列の送信 FDE 重みを乗算して、 $N_{\text{mbs}} \times Q$ 送信信号行列を生成する。送信 FDE 重みは送信シンボルと STBC 復号後の受信シンボルの受信信号電力対雑音電力比 (SNR) を最大化する送信 MRT-FDE を用い、次式で表される。

$$\mathbf{W}_{\text{mrt}}(k) = \mathbf{A} \mathbf{H}^H(k) \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{A} と $\mathbf{H}(k)$ はそれぞれ、次式で与えられる電力正規化係数と N_{ue} 行 $\times N_{\text{mbs}}$ 列の周波数領域チャネル行列である。 $[\cdot]^H$ はエルミート転置を意味する。

$$\mathbf{A} = \left(\frac{1}{N_c/N_{\text{RB}}} \sum_{k=n(N_c/N_{\text{RB}})}^{(n+1)(N_c/N_{\text{RB}})-1} \sum_{n_{\text{mbs}}=0}^{N_{\text{mbs}}-1} \sum_{n_{\text{ue}}=0}^{N_{\text{ue}}-1} |H_{\downarrow}(k; n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}})|^2 \right)^{-1/2} \quad (3)$$

$$\mathbf{H}(k) = \begin{bmatrix} H(k; 0, 0) & \cdots & H(k; 0, N_{\text{mbs}}-1) \\ \vdots & & \vdots \\ H(k; N_{\text{ue}}-1, 0) & \cdots & H(k; N_{\text{ue}}-1, N_{\text{mbs}}-1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

MRT-FDE 重みを掛けた後の送信信号行列 $\mathbf{S}(k) = [S(k; n_{\text{mbs}}, q); n_{\text{mbs}}=0\sim N_{\text{mbs}}-1, q=0\sim Q-1]^T$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{S}(k) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \mathbf{W}_{\text{mrt}}(k) \mathbf{X}(k) \quad (5)$$

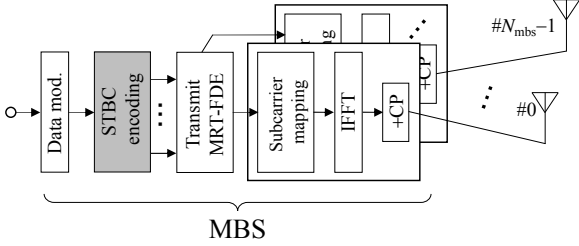
ここで E_s および T_s は送信データシンボルエネルギーおよびデータシンボル長をそれぞれ表している。その後、サブキャリアマッピングを行い、 N_{RB} 個のリソースブロックを全周波数帯域にマッピングした信号行列に対して N_c ポイントの IFFT を適用し、OFDM シンボルのガード区間に Cyclic Prefix (CP) を挿入した後、 N_{mbs} 本の分散アンテナから信号を送信する。

各 UE では、受信信号から CP 除去後、 N_c ポイントの FFT を適用して、サブキャリアデマッピングを行い、割り当てられた第 n リソースブロックの信号を取り出

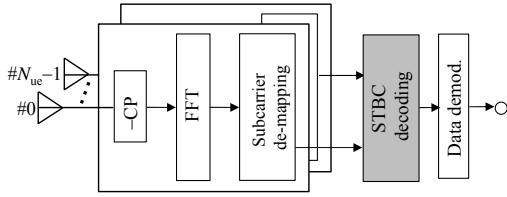
す. サブキャリアデマッピング後の受信信号は, 次式のように N_{ue} 行 $\times Q$ 列の行列 $\mathbf{R}(k)=\{\mathbf{R}(k;n_{ue},q); n_{ue}=0\sim N_{ue}-1, q=0\sim Q-1\}$ として表現できる.

$$\begin{aligned}\mathbf{R}(k) &= \mathbf{H}(k)\mathbf{S}(k) + \mathbf{N}(k) \\ &= \sqrt{\left(\frac{2E_s}{T_s}\right)} \mathbf{A}(\mathbf{H}(k)\mathbf{H}^H(k))\mathbf{X}(k) + \mathbf{N}(k)\end{aligned}\quad (6)$$

ここで, $\mathbf{N}(k)=\{N(k;n_{ue},q); k=0\sim N_{ue}-1, q=0\sim Q-1\}$ は第 N_{ue} 行 $\times Q$ 列の熱雑音行列であり, 各要素はゼロ平均で分散 $2N_0/T_s$ を持つ独立な複素ガウス変数である. 次いで STBC 復号を行い, 最後にデータ復調を行う.



(a) 送信機 (MBS 側)



(b) 受信機 (UE 側)
図 2 送受信機構成

3.2. リンク容量

本稿では, STBC 復号後の受信信号対雑音電力比 (SNR) とシャノンの容量式 [1] に基づいて OFDM 下りリンク容量を求める. 総サブキャリア数 N_c に対して周波数分割多重によって $U_m (=N_{RB})$ 台の UE を多重し, 各 UE には N_c/N_{RB} 本のサブキャリアが割り当てられているものとする. 一般性を失うことなく, 第 n リソースブロックには $k=n(N_c/N_{RB})\sim(n+1)(N_c/N_{RB})-1$ 番目の N_c/N_{RB} 本のサブキャリアを割り当てるものとする. 第 n リソースブロックを割り当てられた時の第 u UE の OFDM 下りリンク容量 $C_u(n)$ (bps/Hz) は次式により計算できる.

$$C_u(n) = \frac{1}{N_c/N_{RB}} \sum_{k=n(N_c/N_{RB})}^{(n+1)(N_c/N_{RB})-1} \log_2(1+\gamma_u(k)) \quad (7)$$

ここで $\gamma_u(k)$ は STBC 復号後の第 k サブキャリアの瞬時 SNR であり, 次式で表される [6].

$$\gamma_u(k) = \frac{E_s}{N_0} \left| \frac{\sum_{n_{ue}=0}^{N_{ue}-1} \sum_{n_{mbs}=0}^{N_{mbs}-1} |H(k;n_{ue},n_{mbs})|^2}{\sum_{k=n(N_c/N_{RB})}^{(n+1)(N_c/N_{RB})-1} \sum_{n_{mbs}=0}^{N_{mbs}-1} \sum_{n_{ue}=0}^{N_{ue}-1} |H(k;n_{ue},n_{mbs})|^2} \right|^2 \quad (8)$$

ここで E_s/N_0 は送信シンボルエネルギー対熱雑音電力スペクトル密度比である.

4. マルチユーザスケジューリング

本稿では, Proportional Fair (PF) 規範, Max-C/I 規範および Round Robin (RR) 規範を用いた 3 つのスケジューリング戦略 [9] について検討している. スケジューラは第 t タイムスロットにおいて, マクロセル内に存在するアクティブユーザ U_a 台から $U_m (=N_{RB})$ 台をリソースブロック毎に排他的に選択する. 同一タイムスロット内で, 各ユーザには最大 1 つのリソースブロックが割り当てられる.

PF スケジューリングでは, 第 n リソースブロックを割り当てた時に, 次式が最大となるユーザに第 n リソースブロックを割り当てる. この時のユーザインデックス $u^*(n,t)$ は次式で与えられる.

$$u^*(n,t) = \arg \max_{0 \leq u \leq U_a-1} \frac{C_u(n,t)}{C_u(t-1)} \quad (9)$$

ここで $C_u(n,t)$ は第 u ユーザが第 t タイムスロットの第 n リソースブロックを割り当てられた場合の瞬時ユーザリンク容量であり, 次式で与えられる.

$$C_u(n,t) = a_u(n,t) \cdot \frac{1}{N_c/N_{RB}} \sum_{k=n(N_c/N_{RB})}^{(n+1)(N_c/N_{RB})-1} \log_2(1+\gamma_u(k)) \quad (10)$$

ここで $a_u(n,t)$ は第 u ユーザが第 t タイムスロットの第 n リソースブロックを割り当てられたかを示す変数であり, 割り当てられた場合は 1, 割り当てられなかった場合は 0 となる. また, $\bar{C}_u(t-1)$ は第 u ユーザの第 $t-1$ タイムスロットまでの平均ユーザリンク容量であり, 次式で与えられる.

$$\bar{C}_u(t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{T_{ave}}\right) \bar{C}_u(t-1) & u \neq u^* \\ \left(1 - \frac{1}{T_{ave}}\right) \bar{C}_u(t-1) + \frac{1}{T_{ave}} C_u(t) & u = u^* \end{cases} \quad (11)$$

ここで T_{ave} は平均化区間である.

Max-C/I スケジューリングでは, 各タイムスロットにおける瞬時リンク容量が最大となるユーザをスケジューリングする. 第 t タイムスロットにおける第 n リソースブロックに割り当てられるユーザインデックス $u^*(n,t)$ は次式で与えられる.

$$u^*(n,t) = \arg \max_{0 \leq u \leq U_a-1} C_u(n,t) \quad (12)$$

RR スケジューリングでは, ユーザの瞬時チャネル状態を考慮することなく, 各ユーザに順番にリソースブロックを割り当てていくスケジューリング戦略である. 各ユーザに与えられる通信機会は公平になるが, チャネル状態の悪いユーザにも無線リソースを割り当てるため, 一般的には各ユーザが得られる通信リンク容量は公平とはならない. しかしながら, 広帯域無線

通信のような周波数選択性が強い伝搬環境の場合、各ユーザのリソースブロック内平均チャネル利得の差が小さくなるため、PFスケジューリングと比べても遜色のない公平性と通信リンク容量を達成できるものと期待できる。

$$FI = \frac{\left(\sum_{u=0}^{U_a-1} \frac{1}{T_m} \sum_{t=1}^{T_m-1} C_u(t) \right)^2}{U_a \cdot \sum_{u=0}^{U_a-1} \left| \frac{1}{T_m} \sum_{t=1}^{T_m-1} C_u(t) \right|^2} \quad (14)$$

5. 計算機シミュレーション

CDATを用いたネットワークの下りリンク容量を計算機シミュレーションにより求めた。広帯域無線伝搬チャネルは伝搬損失、シャドウイング損失、および周波数選択性フェージングによって特徴づけられる[1]。DA—UE間距離が小さい場合は見通し環境となり、フェージングチャネルは周波数選択性仲上・ライスフェージングによって特徴づけられると考えられる。第 n_{mbs} DA—第 u UE間距離($d_{u,n_{mbs}}$)が小セル半径以下の場合($d_{u,n_{mbs}} \leq R'$)は、DA—UE間のチャネルは周波数選択性仲上・ライスフェージングによって特徴づけられるものとし、第 n_{mbs} DA—第 u UE間距離が小セル半径より大きい場合($d_{u,n_{mbs}} > R'$)は、DA—UE間のチャネルは周波数選択性レイリーフェージングによって特徴づけられるものとする。第 n_{mbs} DA—第 n_{ue} UEアンテナ間のチャネルインパルス応答 $h(n_{ue}, n_{mbs}, \tau)$ は次式で表される。

$$h(n_{ue}, n_{mbs}, \tau) = \sqrt{d_{u,n_{mbs}}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\eta_{u,n_{mbs}}}{10}}}$$

$$\times \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{K}{K+1}} \exp(j\theta_{n_{ue}, n_{mbs}}) \delta(\tau - \tau_{n_{ue}, n_{mbs}}) \\ + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \sum_{l=0}^{L-1} \zeta_{n_{ue}, n_{mbs}}(l) \delta(\tilde{\tau}_{n_{ue}, n_{mbs}}(l)) \end{array} \right\} \quad (13)$$

ここで α は伝搬損失指数であり、 $\eta_{u,n_{mbs}}$ は第 n_{mbs} DA—第 u UE間のシャドウイング損失(dB)である。また、 K は仲上・ライスフェージングの K ファクタである。 $\theta(n_{ue}, n_{mbs})$ は第 n_{mbs} DA—第 n_{ue} UEアンテナ間チャネルの直接波の位相であり、 $\tau_{n_{ue}, n_{mbs}}$ は直接波の遅延時間である。また、 $\zeta_{n_{ue}, n_{mbs}}(l)$ は第 n_{mbs} DA—第 n_{ue} UEアンテナ間チャネルの第 l 遅延パスの複素パス利得であり、 $\tilde{\tau}_{n_{ue}, n_{mbs}}(l)$ は第 l 遅延パスの遅延時間である。

シミュレーション諸元を表1に示す。FFT/IFFTブロックサイズ N_c およびCP長 N_g はそれぞれ $N_c=128$ および $N_g=16$ とし、マクロセル内に配置するDA本数 $N_{macro}=7$ としている。伝搬損失指数 α およびシャドウイング損失の標準偏差 σ はそれぞれ $\alpha=3.5$ および $\sigma=7.0$ dBと仮定している。またDA—UE間距離が小セル半径 R' 以下の場合($d_{u,n_{mbs}} \leq R'$)は、フェージングチャネルは K ファクタ $K=10$ の周波数選択性仲上・ライスフェージングチャネルになり、DA—UE間距離が小セル半径 R' より大きい場合($d_{u,n_{mbs}} > R'$)は、周波数選択性レイリーフェージング(つまり $K=0$)になるものと仮定している。また、タイムスロット間のフェージングは独立で無相関と仮定した。ユーザ間の公平性の指標であるFIは以下のように定義される[8]。

ここで T_m は $C_u(t)$ の時間平均区間である。

本稿では、チャネル推定は理想的に行えるものと仮定している。平均合計リンク容量、UEリンク容量およびFIの累積分布関数(CDF)を計算機シミュレーションにより求め、UEリンク容量のCDFの10%値を10%アウトエッジUEリンク容量と呼ぶ。

表1 シミュレーション諸元

Network	No. of distributed antennas	$N_{macro}=7$
	Small-cell radius	$R'=R/\sqrt{7}$
Transmitter/Receiver	No. of FFT/IFFT block size	$N_c=128$
	Guard interval length	$N_g=16$
	No. of transmit antennas	$N_{mbs}=1, 4$
	No. of receive antennas	$N_{ue}=1$ or 2
Channel	Path loss exponent	$\alpha=3.5$
	Shadowing loss standard deviation	$\sigma=7.0$ (dB)
	Channel estimation	Ideal
	Frequency-Selective block Nakagami-Rice/ Rayleigh fading	
	Nakagami-Rice K-factor	$K=10$ (dB)
	Delay profile	1 or 16-path uniform

5.1. 周波数ダイバーシチ効果

図3に送受信アンテナ本数の積(つまり空間ダイバーシチ次数)が $N_{mbs} \times N_{ue}=1$ 、多重ユーザ数/アクティブユーザ数が $2/14$ の場合について、マルチパス数が $L=1$ および 16 であるときの平均合計リンク容量とFIとの関係を示す。図3よりマルチパス数 L が1から16へと増加すると、PFスケジューリングの平均合計リンク容量の低下が見られる。これは、広帯域伝送のように周波数選択性が強いチャネル環境では、各ユーザのリソースブロック内平均チャネル利得の差が小さくなるためである。

次に、図4に空間ダイバーシチ次数が $N_{mbs} \times N_{ue}=8$ 、マルチパス数が $L=16$ 、アクティブユーザ数が $U_a=14$ の場合について、多重ユーザ数 U_m を2から8へと増加させたときの平均合計リンク容量の変化を示す。図4より、多重ユーザ数を増やしていくと、PFスケジューリングはRRスケジューリングより高い平均合計リンク容量を達成できることが分かる。これは、多重ユーザ数を増やすと、ユーザ当りの割り当てサブキャリア数が減り($N_{RB}=U_m=2 \rightarrow 8$ のとき $N_c/N_{RB}=64 \rightarrow 16$ サブキャリア)、チャネルの周波数選択性が弱くなることでユーザ間のリソースブロック内平均チャネル利得に差が出てくるためである。しかし、RRスケジューリングに対するPFスケジューリングによるリンク容量の向上は1.05倍程度しかない。

図5に第 $u \neq 0$ ユーザと第 $u \neq 1$ ユーザに着目したチャネルの伝達関数を示す。リソースブロック内平均チャネル利得は割当サブキャリア数に依存する。多重ユーザ数を多くする、つまり割当サブキャリア数を少なくすると、リソースブロック内平均チャネル利得の変動が大きくなる。PFスケジューリングはこのチャネル利

得の差を利用して、リンク容量を向上できる。

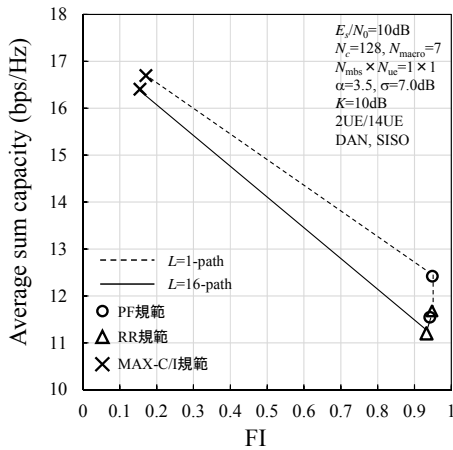


図 3 平均合計リンク容量と FI との関係 (マルチパス数 $L=1 \rightarrow 16$)

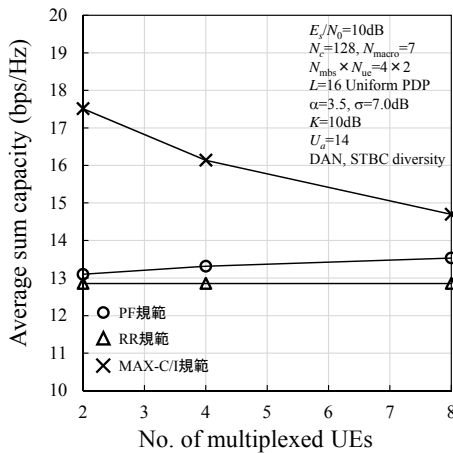


図 4 多重 UE 対平均合計リンク容量特性 (多重ユーザ数 $U_m=2 \rightarrow 8$)

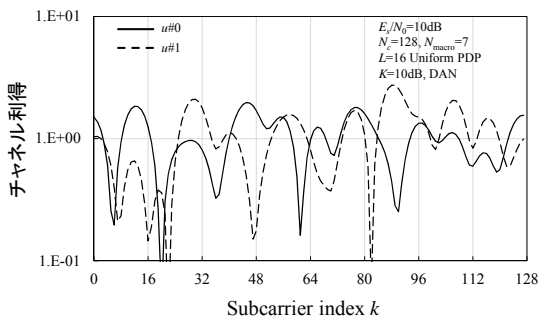


図 5 周波数選択性チャンネルの伝達関数

5.2. 空間ダイバーシチ効果

図 6 および 7 に、多重ユーザ数/アクティブユーザ数 $=2/14$ でマルチパス数 $L=16$ の場合について、空間ダイバーシチ次数を $N_{\text{mbs}} \times N_{\text{ue}}=1 \rightarrow 8$ と増加させたときの平均合計リンク容量と FI との関係および 10% アウテージ UE リンク容量と FI の関係をそれぞれ示す。図 6 より、PF スケジューリングおよび RR スケジューリング共に 8 次 ($N_{\text{mbs}} \times N_{\text{ue}}=4 \times 2$) の空間ダイバーシチ効果

の増加によって平均合計リンク容量が約 1.2 倍に向上していることが分かる。また、図 7 より、10% アウテージ UE リンク容量が PF スケジューリングでは約 1.2 倍に、RR スケジューリングでは約 1.3 倍に向上していることが分かる。いずれの場合とも、PF スケジューリングと RR スケジューリングのリンク容量の差は小さい。これらの結果より、強い周波数選択性チャンネル時と同様に、大きな空間ダイバーシチ次数の STBC ダイバーシチを用いるときには RR スケジューリングを用いても PF スケジューリングと遜色のないリンク容量が得られることが分かる。また、図 7 から分かるように、MAX-C/I スケジューリングの 10% アウテージ UE リンク容量が非常に小さくなっている。これは、MAX-C/I スケジューリングでは、合計リンク容量が最大になるようにチャンネル状態の良いユーザを常に選択するため、リンク容量の低いユーザには通信機会がほぼ与えられないからである。このことは図 8 に示した通信機会の分布の測定結果からよく分かる。MAX-C/I スケジューリングでは第 $u\#2$ ユーザと第 $u\#4$ ユーザのみに通信機会を与えているが、PF および RR スケジューリングでは全てのユーザにほぼ同じ通信機会を与えている。

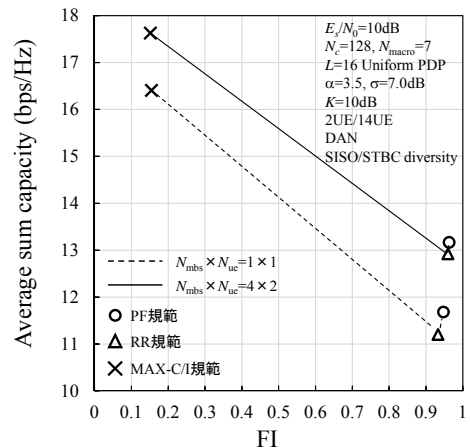


図 6 平均合計リンク容量と FI との関係 ($N_{\text{mbs}} \times N_{\text{ue}}=1 \rightarrow 8$)

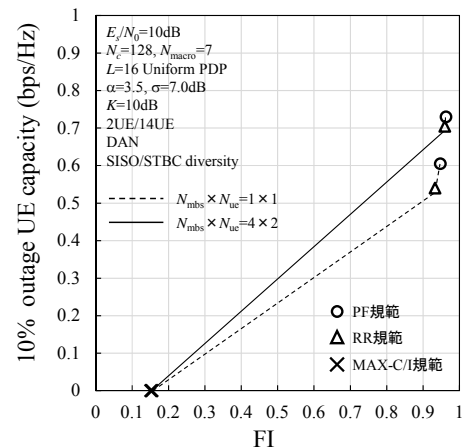


図 7 10% アウテージ UE リンク容量と FI との関係 ($N_{\text{mbs}} \times N_{\text{ue}}=1 \rightarrow 8$)

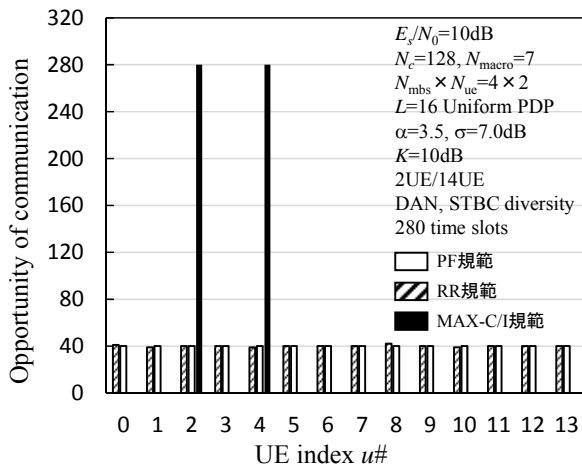


図8 通信機会の分布 (延べ 560 回の送信回数)

5.3. マルチユーザダイバーシチ効果

図9に空間ダイバーシチ次数が $N_{mbs} \times N_{uc} = 8$, マルチパス数 $L=16$, 多重ユーザ数が2の場合について, アクティブユーザ数 U_a を7から28へと増加させたときの平均合計リンク容量とFIとの関係を示す. 図9より, アクティブユーザ数が28と多いときでも, PFスケジューリングとRRスケジューリングのリンク容量の差は僅かである. これは, 5.2節および5.3節の結果と同様に, 高い周波数ダイバーシチ効果と空間ダイバーシチ効果とによって, ユーザ毎のリソースブロック内平均チャネル利得の差が小さくなるためである. 一方, MAX-C/Iスケジューリングはアクティブユーザが増えたことで, より良いチャネル状態のユーザを選択できるようになるから平均合計リンク容量が向上する(その代わりに, 公平性は逆に低下する).

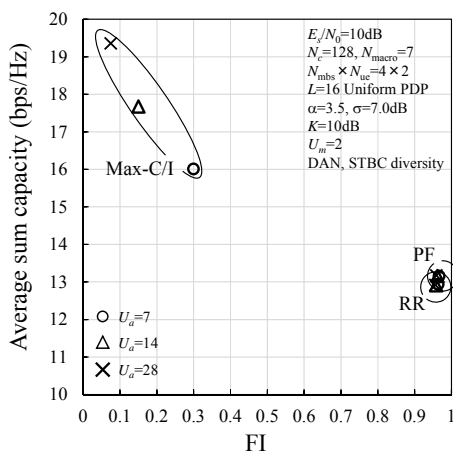


図9 平均合計リンク容量とFIとの関係 (アクティブユーザ数 $U_a=7 \rightarrow 28$)

6. まとめ

本報告では, STBCダイバーシチとユーザスケジューリングを用いるOFDM下りリンクCDATを対象に, PF, RRおよびMAX-C/Iスケジューリングによる平均合計リンク容量, UEリンク容量および公平性指標値を求め, STBCダイバーシチを用いる広帯域移動データ通信ではRRスケジューリングとPFスケジューリン

グのリンク容量の差は僅かであり, 演算量の少ないRRスケジューリングで十分であること, 大きな空間ダイバーシチ次数を得られるSTBCダイバーシチがリンク容量の向上に効果的であることを明らかにした.

謝辞

本稿は, 総務省委託研究開発「第5世代移動通信システム実現に向けた研究開発~超高密度マルチバンド・マルチアクセス多層セル構成による大容量化技術の研究開発~」(#0155-0019, 2016年4月)による委託を受けて実施した研究開発による成果である

文献

- [1] J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital communications*, 5th ed., McGraw-Hill, 2008.
- [2] 瀬山崇志, 小林崇春, 伊達木隆, 関宏之, 箕輪守彦, 須山聡, 奥村幸彦, “5G超高密度分散アンテナシステムにおける協調MU-MIMO送信の基礎検討,” 信学会ソサイエティ大会, B-5-65, 2015年9月.
- [3] 筒井正文, 安藤和明, 秋山千代志, 伊達木隆, 関宏之, 箕輪守彦, 奥山達樹, 須山聡, 奥村幸彦, “5G超高密度分散アンテナシステムにおける広帯域MU-MIMO伝送特性の屋内実験検証,” 信学技報, vol. 115, no. 396, RCS2015-302, pp. 131-136, 2016年1月.
- [4] S. M. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [5] V. Tarokh, H. Jafarkhani and A. R. Calderbark, “Space-time block coding for wireless communications: performance results,” *IEEE J. Sel. Areas. Commun.*, vol. 17, no. 3, pp. 451-460, Mar. 1999.
- [6] H. Tomeba, K. Takeda, and F. Adachi, “Space-time block coded joint transmit/receive diversity in a frequency-nonselective Rayleigh fading channel,” *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E89-B, No. 8, pp. 2189-2195, Aug. 2006.
- [7] 盛夢都, 宮崎寛之, 安達文幸 “分散アンテナ時空間ブロック符号化ダイバーシチを用いるOFDMA下りリンクにおけるスケジューリングに関する検討”, 信学技報, vol. 115, no. 472, RCS2015-337, pp. 25-30, 2016年3月.
- [8] R. Jain, D. Chiu, and W. Hawe, “A Quantitative Measure of Fairness nad Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer System,” DEC Research Report, TR-301, Sept. 1984.
- [9] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Sköld, *4G:LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, 2nd ed., Academic Press, 2014.