

1FF スケジューリングの公平性と定常状態の関係に関する研究

M2010MM029 中内 芳朗

指導教員：石崎 文雄

1 はじめに

近年、無線ネットワークにおいてマルチユーザダイバーシチ (multiuser diversity)[1] を使用したパケットスケジューリングの研究が盛んに行われている [2, 3, 4]. マルチユーザダイバーシチはチャネル変動が独立な多数のユーザが存在するシステムにおいて、任意の時間で一部のユーザが他のユーザに比べて良好なチャネル利得を持つことから発生するダイバーシチである. マルチユーザダイバーシチを利用したスケジューリングでは、システム全体の情報理論的チャネル容量とユーザ間でのサービスの公平性の間にトレードオフの関係があることが知られており、その両立が問題となっている. システム全体のチャネル容量とユーザ間でのサービスの公平性の間のトレードオフの関係の観点において両極端にあるスケジューリングは、RR(Round-Robin) スケジューリングと KH(Knopp and Humblet) スケジューリング [1] である. RR スケジューリングはマルチユーザダイバーシチを全く利用せず、ユーザのチャネル状態とは無関係に、決められた順番に全てのモバイルステーション (MS) をサービスするスケジューリングである. マルチユーザダイバーシチを利用しないためシステム全体のチャネル容量は低いが、ユーザ間の公平性は優れている. 一方、KH スケジューリングはマルチユーザダイバーシチを最大限利用したスケジューリングである. 常に最も SNR(Signal-to-Noise Ratio) 値の高い MS をサービスするので、システム全体でのチャネル容量は最大となる. しかしながら、KH スケジューリングはシステム全体のチャネル容量を最大化するが、平均 SNR 値の低いユーザが選ばれにくくユーザ間の公平性に深刻な問題が発生することが知られている [3].

サービス全体のチャネル容量とユーザ間でのサービスの公平性の間に存在するトレードオフにおいて適当なバランスを取るために PF(Proportional Fair) スケジューリングが考え出された. PF スケジューリングでは、各ユーザの SNR 値をそのユーザの平均 SNR 値で正規化し、正規化 SNR 値の最も高い MS をサービスのために選択する. 各ユーザの正規化 SNR 値は独立同一分布 (independent and identically distributed) に従うので、PF スケジューリングにおいては、各ユーザがサービスのために選ばれる確率は等しく、ユーザ間の厳密な長期間公平性 (long-term fairness) が達成できる. また、システム全体のチャネル容量も、マルチユーザダイバーシチを全く利用しない RR スケジューリングに比べて相当大きくなることが知られている.

しかしながら、PF スケジューリングでは各 MS が基地局 (BS) に正規化 SNR 値を報告することが必要であり、そのために帯域と MS の電力を消費するという問題がある. そこで、正規化 SNR 値を BS に報告する代わりにそれを量子化した値を報告する QPF(Quantized PF) スケ

ジューリングが考えられた [4, 5]. QPF スケジューリングは、各 MS が BS に量子化された正規化 SNR 値を表わす量だけを報告すればよいので帯域の消費が少なく、また適切な量子化を行えばたとえ 2 段階の量子化であっても PF スケジューリングに比べて遜色のないチャネル容量を達成できることが知られている [6]. この 2 段階の量子化を行う QPF スケジューリングのことを 1FF(One-Bit Feedback Fair) スケジューリングと呼ぶ. また、1FF スケジューリングは PF スケジューリングと同じ長期間公平性を達成できる.

無線通信網においてユーザ間の公平性は重要な性能指標であるが、マルチユーザダイバーシチを利用したスケジューリングにおけるユーザ間の公平性に関する研究はまだ十分ではない. 公平性については、有限期間内での公平性の指標である短期間公平性 (short-term fairness) と無限期間内での公平性の指標である長期間公平性を考えることができる. 短期間公平性に関する研究は現在までほとんど行われていない. 短期間公平性は各ユーザの遅延性能など重要な性能指標と密接な関連があるので、たとえ長期間公平性が達成されていても短期間公平性が不十分なスケジューリングは、各ユーザの性能に深刻な問題を発生させることになる.

スケジューリングにおいて実現される短期間公平性は MS の初期状態に大きく依存することになるが、短期間公平性に関するほとんどの研究は初期状態においてすべての MS が定常状態であることを仮定しており、[8] その初期状態の影響は現在まで詳しく調べられていない [9]. したがって、スケジューリングにおいて実現される短期間公平性を評価するためには短期間公平性が劣悪となるような MS の初期状態も含め、様々な初期状態のもとでの短期間公平性の特性を調べる必要がある.

本研究では、1FF スケジューリングの短期間公平性に関する性質についてシミュレーションにより調査する. 短期間の公平性の指標として STAFI(Statistical Time-Access Fairness Index)[7] を考え、STAFI の MS、正規化 SNR 値、計測時間、指標による変化を観察する. また、定常状態にある MS 群に新たに初期状態の MS をいくつか参入させるという環境を考え、MS の初期状態の STAFI に及ぼす影響をシミュレーションにより調査する.

2 モデル

2.1 システムモデル

本研究では図 1 で示されるようなセルラ無線通信ネットワークを考える. システムは K 個の MS と 1 つの BS から構成されており、BS は K 個の MS との通信を行う下りリンクにおいて 1FF スケジューリングによりスケジューリングを行う. また、時間は T_f の等間隔に分割されており、 T_f を単位時間としてスケジューリングが行われるものと

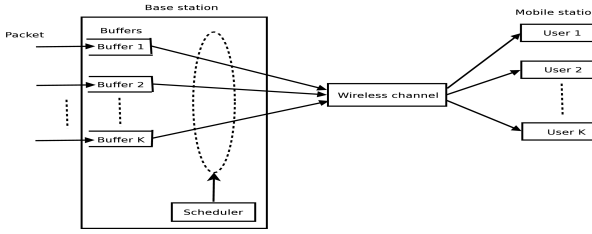


図 1 システムモデル

する。時刻 t ($t = 0, 1, \dots$) での MS i ($i = 1, \dots, K$) の正規化 SNR 値を $z^{(i)}(t)$ とし、各 MS の無線チャネルの正規化 SNR 値の変化を表す確率過程 $\{z^{(i)}(t)\}$ は、レイリーフェージングチャネルモデル [10] で記述することができ、確率過程は有限状態マルコフ連鎖でうまく近似できる [11]。

以下で、[11] で提案された有限状態マルコフ連鎖モデルを説明する。まず、正規化 SNR 値の取り得る値を $\{\gamma_n\}_{n=0}^N$ に分割する。ここで、 $\gamma_0 = 0$, $\gamma_l < \gamma_{l+1}$ ($l = 0, \dots, N$), $\gamma_{N+1} = \infty$ である。次に、有限状態マルコフ連鎖の状態空間を $\{0, \dots, N\}$ とし、状態 n は SNR 値が $[\gamma_n, \gamma_{n+1})$ であることを表わしているものとする。 $P_{i,j}$ ($i, j = 0, \dots, N$) を有限状態マルコフ連鎖の遷移確率とする。ここで、有限状態マルコフ連鎖は隣接した状態あるいは自分自身への状態へのみ状態遷移を行うと仮定する。この仮定は短い T_f に関しては自然な仮定である。この仮定より、

$$P_{l,n} = 0, \quad |l - n| \geq 2 \quad (1)$$

を得る。次に、隣接した状態への遷移確率の中で、現在の状態から 1 つ上の状態への遷移確率は、

$$P_{n,n+1} = \frac{N_{n+1}T_f}{P_r(n)}, \quad (n = 0, \dots, N-1) \quad (2)$$

で、現在の状態から 1 つ下の状態への遷移確率は

$$P_{n,n-1} = \frac{N_n T_f}{P_r(n)}, \quad (n = 1, \dots, N) \quad (3)$$

で定められる。また、同じ状態にとどまる場合の遷移確率は

$$P_{n,n} = \begin{cases} 1 - P_{n,n+1} - P_{n,n-1}, & (0 < n < N) \\ 1 - P_{0,1}, & (n = 0) \\ 1 - P_{N,N-1}, & (n = N) \end{cases} \quad (4)$$

で定められる。式 (2), (3) に含まれる N_n は Level Crossing Rate, すなわち SNR 値が γ_n を横切る率を表わしており、以下の式で与えられる [13]。

$$N_n = \sqrt{2\pi} \frac{\gamma_n}{\bar{\gamma}} f_d \exp\left(-\frac{\gamma_n}{\bar{\gamma}}\right) \quad (5)$$

ここで、 f_d は MS の移動により引き起こされるドップラー拡散を表わし、 $\bar{\gamma} = E[\gamma]$ は平均 SNR 値を表わす。また $P_r(n)$ ($n = 0, \dots, N$) は有限状態マルコフ連鎖が状態 n

にある定常状態確率を表しており、

$$\begin{aligned} P_r(n) &= \int_{\gamma_n}^{\gamma_{n+1}} p_\gamma(\gamma) d\gamma \\ &= \exp\left(-\frac{\gamma_n}{\bar{\gamma}}\right) - \exp\left(-\frac{\gamma_{n+1}}{\bar{\gamma}}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

で与えられる。式 (1)–(6) を使って有限状態マルコフ連鎖の遷移確率をすべて定めることができる。

2.2 公平性指標

本研究では、スケジューリングの短期間公平性を評価するための指標として MS1 と MS2 の間の STAFI について考える。 $[0, 1)$ の一様分布によって導かれる独立同一分布に従う確率過程 $\{v(t)\}$ ($t = 0, 1, \dots$) を使用する。確率変数 $\nu^{(i)}(t)$ ($i = 1, 2; t = 0, 1, \dots$) を定義する。

$$\nu(t) = \sum_{k=1}^K I(s^{(k)}(t) = 1) \quad (7)$$

$I(\cdot)$ は指標関数を意味する。 $c^{(i)}(t)$ ($i = 1, \dots, K; t = 0, 1, \dots$) は、時間 t における MS i のサービス量に代表する確率変数である。すなわち、1FF スケジューリングで時間 t において下りリンクの伝送のために MS i が選択された時 $c^{(i)}(t) = 1$ であり、MS i 以外が選択された時 $c^{(i)}(t) = 0$ である。 $c^{(1)}(t)$, $c^{(2)}(t)$ は以下のように表すことができる。

$$c^{(1)}(t) = \begin{cases} 1 & (s^{(1)}(t) = 1, v(t) \in [0, 1/\nu(t))) \\ 1 & (\nu(t) = 0, v(t) \in [0, 1/K)) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (8)$$

$$c^{(2)}(t) = \begin{cases} 1 & (s^{(2)}(t) = 1, v(t) \in [s^{(1)}(t)/\nu(t), (s^{(1)}(t) + 1)/\nu(t))) \\ 1 & (\nu(t) = 0, v(t) \in [1/K, 2/K)) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (9)$$

MS i の $[t_0, t_0 + T)$ でのサービス量 $\alpha^{(i)}(t_0, t_0 + T)$ は以下のように表すことができる。

$$\alpha^{(i)}(t_0, t_0 + T) = \sum_{t=t_0}^{t_0+T-1} c^{(i)}(t) \quad (10)$$

以上の式をもとに、STAFI $G_T(x)$ は以下のように定義する。

$$G_T(x) = P(|\alpha^{(1)}(t_0, t_0+T) - \alpha^{(2)}(t_0, t_0+T)| \geq x) \quad (11)$$

ここで、STAFI は $0 \leq G_T(x) \leq 1$ であり、0 に近いほど公平性が高く、1 に近いほど公平性が低いことになる。

3 シミュレーション結果

本節では、1FF スケジューリングの STAFI $G_T(x)$ をシミュレーションによって調べ、1FF スケジューリングの短期間公平性と定常状態の関係について論じる。1FF スケジューリングの計測時間 T と STAFI の MS1 と MS2 の選択される回数の差を測るための指標 x を固定して、MS の数 K と正規化 SNR 値 $\gamma_1/\bar{\gamma}$ を変化させ、また、MS の

表 2 MS の数と正規化 SNR 値を変化させた場合の STAFI

条件	定常状態	MS1 のみ状態 0	MS1,2 が状態 0	MS1,2 が状態 1
$\gamma_1/\bar{\gamma} = 2.00$ dB, $K = 20$	3.03×10^{-2}	2.82×10^{-2}	2.54×10^{-2}	3.64×10^{-2}
$\gamma_1/\bar{\gamma} = 2.00$ dB, $K = 30$	0.27×10^{-2}	0.24×10^{-2}	0.21×10^{-2}	0.35×10^{-2}
$\gamma_1/\bar{\gamma} = 2.00$ dB, $K = 40$	0.01×10^{-2}	0.01×10^{-2}	0.01×10^{-2}	0.02×10^{-2}
$\gamma_1/\bar{\gamma} = 3.78$ dB, $K = 20$	8.43×10^{-2}	8.00×10^{-2}	7.53×10^{-2}	12.4×10^{-2}
$\gamma_1/\bar{\gamma} = 3.78$ dB, $K = 30$	3.50×10^{-2}	3.29×10^{-2}	3.06×10^{-2}	5.46×10^{-2}
$\gamma_1/\bar{\gamma} = 3.78$ dB, $K = 40$	1.30×10^{-2}	1.21×10^{-2}	1.11×10^{-2}	2.14×10^{-2}
$\gamma_1/\bar{\gamma} = 6.00$ dB, $K = 20$	4.47×10^{-2}	4.29×10^{-2}	4.11×10^{-2}	14.0×10^{-2}
$\gamma_1/\bar{\gamma} = 6.00$ dB, $K = 30$	3.73×10^{-2}	3.58×10^{-2}	3.42×10^{-2}	11.8×10^{-2}
$\gamma_1/\bar{\gamma} = 6.00$ dB, $K = 40$	3.10×10^{-2}	2.97×10^{-2}	2.84×10^{-2}	9.99×10^{-2}

数 K と正規化 SNR 値 $\gamma_1/\bar{\gamma}$ を固定して、計測時間 T と STAFI の MS1 と MS2 の選択される回数の差を測るための指標 x を変化させ、STAFI の変化を観察する。

本節で示すシミュレーション結果においては以下の環境を仮定した。各 MS の無線チャンネルはレイリーフェージングモデルで記述できるとする。各 MS の無線チャンネルの状態を表わす有限状態マルコフ連鎖の状態数は 2、すなわち $N = 1$ とする。1FF スケジューリングなので、量子化のグレード数は 2、すなわち $L = 2$ とする。

本研究では、さまざまな環境を想定してシミュレーションを行うため、計測時間は 1 msec を 1 スロットと考え、256 スロット計測するものとする。すなわち $T = 256$ とする。STAFI の MS1 と MS2 の選択される回数の差を測るための指標を 40 とする。すなわち $x = 40$ とする。正規化 SNR 値 $\gamma_1/\bar{\gamma}$ の値を 2.00, 3.78, 6.00 dB と MS の数 K を 20, 30, 40 変化させることによって、STAFI の変化を観察する。 $\gamma_1/\bar{\gamma} = 3.78$ dB は 1FF スケジューリングにおいて最も高いチャンネル利得が得られる値である。

また、正規化 SNR 値を 3.78 dB とする。すなわち $\gamma_1/\bar{\gamma} = 3.78$ dB とする。MS の数を 20 とする。すなわち $K = 20$ とする。計測時間 T を 32, 64, 128, 256 スロットと変化させ、スロット数において STAFI の MS1 と MS2 の選択される回数の差を測るための指標を 0 から 5 刻みで増加させ、時間の経過とともに STAFI が 0.01 に収束するまでの過程を観察していく。

このとき有限状態マルコフ連鎖の遷移確率を 2.1 節の結果を使って求めたものを表 1 で示す。

表 1 シミュレーションに使用する遷移確率

$\gamma_1/\bar{\gamma}$	P_{00}	P_{01}	P_{10}	P_{11}
2.00 dB	0.991864	0.008136	0.031557	0.968443
3.78 dB	0.996083	0.003917	0.038734	0.961266
6.00 dB	0.999049	0.000951	0.050014	0.949986

上記の MS の数と正規化 SNR 値を変化させる設定で全ての MS が定常状態、MS1 のみが初期状態で参入した場合、MS1, 2 が初期状態で参入した場合、MS1, 2 が良好なチャンネル状態で参入した場合の 4 つの条件のもとで 1FF スケジューリングの STAFI をシミュレーションによって求めたものを表 2 に示す。

また、上記の計測時間と MS1 と MS2 の選択される回数の差を測るための指標を変化させる設定で全ての MS が定常状態、MS1, 2, 3 が良好なチャンネル状態で参入した場合について 1FF スケジューリングの STAFI をシミュレーションによって求めたものを図 2, 3 に示す。

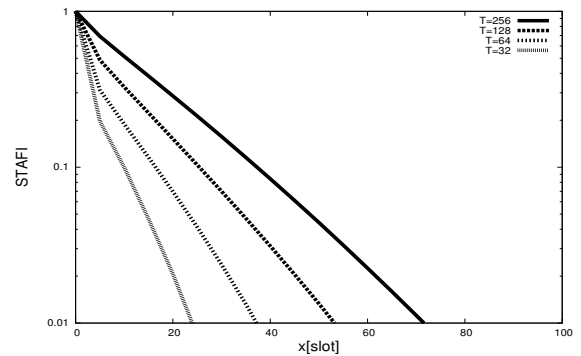


図 2 全ての MS が定常状態での STAFI

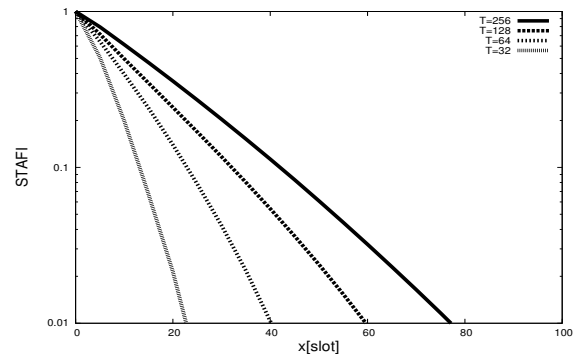


図 3 MS1,2,3 が状態 1 での STAFI

シミュレーションにおいて必要な疑似乱数は、GNU 科学技術計算ライブラリ (GNU Scientific Library, GSL)[12] の乱数発生器を利用した。シミュレーションによる推定値は 100 個のサンプル平均により得た値をシミュレーション結果として表 2 に示している。

ここで、定常状態の推定値分散を示す。 $\gamma_1/\bar{\gamma} = 3.78$ dB, $K = 20$, $T = 256$ スロット, $x = 40$ の時、推定値分散は $8.49014636(10^{-8})$ であり、非常に小さいことがわかる。つまり、このシミュレーションによって得られた結果は

信頼性が高いものであるといえる。また、他のいずれの条件でも、同様に非常に小さい結果が得られたことも確認できている。

表2から全てのMSが定常状態のSTAFIで最大値は $\gamma_1/\bar{\gamma} = 3.78$ dB, $K = 20$ の時であり、最小値は $\gamma_1/\bar{\gamma} = 2.00$ dB, $K = 40$ である。正規化SNR値 $\gamma_1/\bar{\gamma} = 3.78$ dBはチャンネル容量が最大となる値なので、トレードオフの関係により公平性が低くなり、STAFIが大きくなったと考えられる。また、最小値では閾値が下がることにより多くのMSが状態1に存在する確率が上昇する。さらにMSの数を増加させることで1つのMSが選択される回数が減少するので、高い公平性を得られたといえる。さらに、閾値が無限に近いまたは0に近い場合、MSの状態が片方の状態に偏るので、長期的な公平性は同じになると考えられる。しかしながら、可能性は非常に低いが、閾値が無限に近い場合、MS1が状態1にありその他のMSが状態0にある場合にMS1が選択される確率が高く、公平性に大きな問題を生じる可能性が高い。一方、閾値が0に近い場合、MS1が状態0にありその他のMSが状態1にある場合にMS2が選択させる確率は $1/(K-1)$ であるので、公平性にさほど大きな影響を与えるとは考えられない。よって、 $\gamma_1/\bar{\gamma} = 2.00$ dBの場合により公平性が高くなると考えられる。

また各条件間で比較をすると、定常状態に比べてMS1, 2が状態1の時STAFIが大きくなるのがわかる。これは、MS1, 2が状態1で参入することによってMS1, 2が他のMSより選択される確率が高くなり、MS1, 2の選択回数の差が大きくなりやすく公平性が低くなったことを示している。

図2から、MS1, 2が状態0になる可能性がある場合に短時間で状態が遷移する確率は非常に低いのでMS1, 2ともに選択されることはなく、計測時刻 t が10スロットまでに著しくSTAFIが減少する。その後、時間が経過するにつれて良好な状態に遷移する可能性が生じて選択される確率が増加し、STAFIがなだらかに減少することがわかる。図3から、MS1, 2, 3が良好なチャンネル状態で参入した場合はMS1, 2が良好な状態から始まるので、選択される確率が高く選択回数に差が生じやすくなると考えられる。よって、計測開始の時点からなだらかに減少していることがわかる。

4 おわりに

本研究では、マルチユーザダイバーシチを利用した1FFスケジューリングを考え、1FFスケジューリングの短期間公平性と定常状態との関係について調べた。短期間公平性を評価する指標としてSTAFIを導入し、定常状態と定常状態に新たにMSが参入した場合との違いについて調べた。

シミュレーション結果から、1FFスケジューリングにおいてのSTAFIは定常状態と比べ、通信状態が良好なMSが参入した場合に公平性が著しく損なわれることが確認できた。また、通信状態が良好なMSが参入した場合は、STAFIが計測開始の時点からなだらかに減少するので、計測時間ごとの結果に差が生じやすいことも確認で

きた。

参考文献

- [1] R. Knopp and P. A. Humblet, "Information capacity and power control in single-cell multiuser communications" *Proc. of IEEE ICC '95*, pp.331-335, 1995.
- [2] F. Ishizaki and G. U. Hwang, "Queuing delay analysis for packet schedulers with/without multiuser diversity over a fading channel," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.56, pp.3220-3227, 2007.
- [3] L. Yang, M. Kang and M.-S. Alouini, "On the capacity-fairness tradeoff in multiuser diversity systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.56, pp.1901-1907, 2007.
- [4] F. Florén, O. Edfors and B.-A. Molin, "The effect of feedback quantization on the throughput of a multiuser diversity scheme," *Proc. of IEEE GLOBECOM 2003*, pp.497-501, 2003.
- [5] F. Ishizaki and G. U. Hwang, "Throughput performance of quantized proportional fair scheduling with adaptive modulation and coding," *Proc. of Wireless Telecommunication Symposium*, 2009.
- [6] G. U. Hwang and F. Ishizaki, "Design of a fair scheduler exploiting multiuser diversity with feedback information reduction," *IEEE Communications Letters*, vol.12, pp.124-126, 2008.
- [7] Y. Liu, S. Gruhl and E. W. Knightly, "WCFQ: an opportunistic wireless scheduler with statistical fairness bounds," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.2, pp.1017-1028, 2003.
- [8] F. Ishizaki "Statistical time-access fairness index of one-bit feedback fair scheduler," *Proc. of International Conference on Queuing Theory and Network Applications (QTNA)*, 2011.
- [9] F. Ishizaki, "Effect of initial states on statistical-time access fairness index of one-bit feedback fair scheduler," *Proc. International Workshop on Cross Layer Design*, 2011.
- [10] G. L. Stüber, *Principles of mobile communication*, 2nd ed., Kluwer, 2001.
- [11] Q. Liu, S. Zhou and G. B. Giannakis, "Queuing with adaptive modulation and coding over wireless links: cross-layer analysis and design," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.4, pp.1142-1153, 2005.
- [12] M. Galassi, J. Davies, J. Theiler, B. Gough, G. Jungman, M. Booth, F. Rossi, "GNU Scientific Library." Vol.1 No.8, pp.145-159, 2006.
- [13] M. D. Yacoub, J. E. Vargas Bautista, and L. G. de R. Guedes, "On higher order statistics of the Nakagami- m distribution," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 48, pp.790-794, 1999.