

Opportunistic feedback fair スケジューリング の公平性に関する研究

M2011MM012 長谷川祐

指導教員：石崎文雄

1 はじめに

無線通信網においてマルチユーザダイバーシチ (multiuser diversity)[1] を利用することで情報理論的チャネル容量を増加させることができることが知られている。そのため、近年マルチユーザダイバーシチ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。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、システム全体のチャネル容量とユーザ間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、[2, 3, 4] 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 [4]。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スケジューリング方式として 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、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 One-Bit Feedback Fair(1FF) スケジューリングが考えだされた [3]。1FF 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、帯域の消費が少なく、更に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 1FF スケジューリングではフィードバック情報を読み込む時間が MS の数に依存して増加するという問題がある。そこで、MS の数に依存せずにフィードバックできるランダムアクセスフィードバックを用いた Opportunistic feedback fair スケジューリングが提案された [5]。Opportunistic feedback fair スケジューリングでは、モバイルステーション (MS) からベースステーション (BS) に受信 SNR を報告に上りリンクフレームの最初にある複数のランダムアクセス・ミニスロットを用いる。MS は、自身の受信 SNR 値が予め決められた閾値より大きければ、予め定められた確率で各ミニスロットに BS に 1 ビットのフィードバック情報を返す。各ミニスロットで MS のフィードバック情報は競合し、あるミニスロットで一つの MS だけがフィードバック情報を送信した場合のみ、フィードバック情報は正しく BS に受信される。二つ以上の MS があるミニスロットでフィードバック情報を送信した場合は、衝突が生じ BS はフィードバック情報を受信できない。BS はフィードバック情報が正しく受信された MS の中から一つの MS をランダムに選んで、次の下りリンクのフレームでその MS 宛のフレームを送信する。これによりフィードバックロードは送信者の数に依存しなくなる。

通信網においてユーザ間の公平性は重要な指標であるが、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り、調整が必要となってくる。

本研究では、Opportunistic feedback fair スケジューリングの公平性に関する調査を行う。公平性に関する調査に

はシミュレーションを用い、正規化 SNR 値、ミニスロットにおける送信確率、ミニスロットの数、MS の数を変化させて計測を行い、チャネル容量と公平性のバランスを取る。短期間の公平性の指標として STAFI(Statistical Time-Access Fairness Index)[6] を考え、STAFI の正規化 SNR 値等による変化を観察する。

本稿では第 2 節でモデリングに使用するシステムモデルと Opportunistic feedback fair スケジューリングの概要と公平性指標の定義の説明を、第 3 節ではシミュレーションの環境設定と結果と考察を、第 4 節ではまとめを記述する。

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 Opportunistic feedback fair 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 [7] 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 [8]。

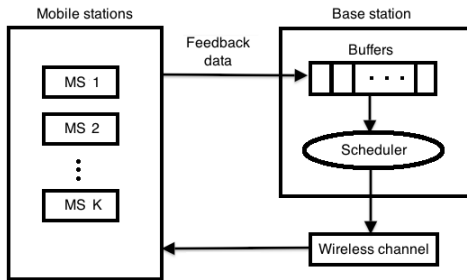


図 1 システムモデル

以下で、[8] 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、 $\gamma_0, \gamma_l < \gamma_{l+1}$ ($l = 0, \dots, N$), $\gamma_{N+1} = \infty$ 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 を横切る率を表しており、以下の式で与えられる。

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

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し、 $\bar{\gamma} = E[\gamma]$ は平均 SNR 値を表す。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 Opportunistic feedback fair スケジューリング

本節では本研究で考える Opportunistic feedback fair スケジューリングについて説明する。BS は Opportunistic feedback fair スケジューリングを行っていると仮定する。Opportunistic feedback fair スケジューリングのもとでは、MS から BS に受信 SNR を報告に上りリンクフレームの最初にある複数のランダムアクセス・ミニスロットを用いる。

Opportunistic feedback fair スケジューリングは以下のように動作する。

- MS が送信しようとする際、MS の状態を表す SNR 値を平均 SNR 値で正規化して更に 2 状態に量子化
- MS が良好な状態を表す「状態 1」の時に、確率 u でミニスロットにフィードバック情報を送信
- 各ミニスロットでただ一つの MS がフィードバック情報を送信した時のみ、そのミニスロットの MS のフィードバック情報は正しく受信される
- 複数のミニスロットで成功した場合、各ミニスロットで成功した MS の中からランダムに選ぶ
- 全てのミニスロットで 1 つも正しく受信されなかった場合、全 MS の中からランダムに選ぶ

2.3 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。

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

$I(\dots)$ 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、Opportunistic feedback fair 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 t 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。

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

以下の式をもとに、STAFI $_T(x)$ 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

本節では、Opportunistic feedback fair スケジューリングの STAFI $_T(x)$ をシミュレーションによって調べ、Opportunistic feedback fair 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。Opportunistic feedback fair スケジューリングの計測時間 T と MS の数 K とミニスロットの数 s とアクセス確率 u を固定して、正規化 SNR 値 $\gamma_1/\bar{\gamma}$ 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。Opportunistic feedback fair スケジューリングであるので、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、計測時間は 1msec 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。MS の数 K は 30、すなわち

$K = 30$ とする。ミニスロット数 s は 5、すなわち $s = 5$ とする。アクセス確率 u は 0.80、すなわち $u = 0.80$ とする。正規化 SNR 値 $\gamma_1/\bar{\gamma}$ の値を 2.00, 4.00, 6.00dB と変化させ、正規化 SNR 値において 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 2 刻みで増加させ、時間の経過とともに STAFI が 0.001 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
4.00 dB	0.996493	0.003507	0.039727	0.960273
6.00 dB	0.999049	0.000951	0.050014	0.949986

上記の正規化 SNR 値と 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 Opportunistic feedback fair 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 に示す。

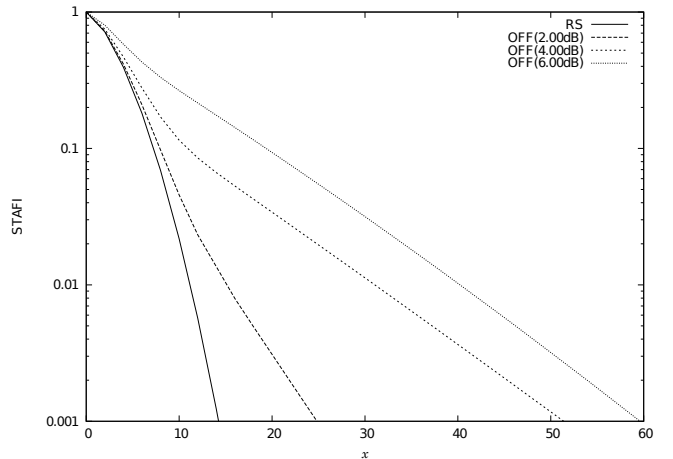


図 2 閾値毎の STAFI

図 2 は横軸に MS1 と MS2 の選択される回数の差を測るための指標 x を、縦軸に STAFI を方対数でとっている。グラフの下に行くほど STAFI が低くなる、すなわち公平性が高くなることを表している。また、RS は Random Scheduler の略であり、チャンネルの状態に関係なく常に 1 つの MS を選択するスケジューラである。

また別の状況を想定するため、別の環境を以下のように設定した。MS の数 K を 30、計測時間 T を 256、正規化 SNR 値 $\gamma_1/\bar{\gamma}$ の値を 2.00dB、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 20 とそれぞれ固定する。ミニスロット数 s を 1 から 4、アクセス確率 u を 0.05 から 1.00 まで 0.05 刻みで変化させてミニスロット数における STAFI を観察した。以下にミニスロット数とアクセス確率における STAFI を求めたものを図 3 に示す。

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)[9]

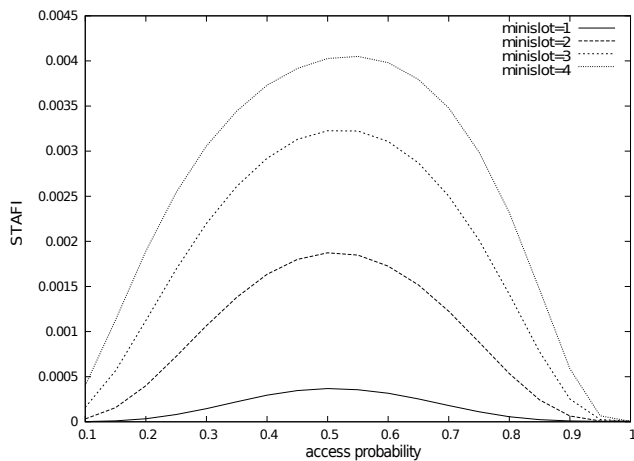


図3 ミニロット数とアクセス確率における STAFI(2.00dB)

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いる。

シミュレーションの結果である図2から、RS(Random Scheduling)のグラフはどのOpportunistic feedback fairスケジューリングのグラフと比べてもSTAFIが低い、すなわち公平性が高いことがわかる。RSは常にOpportunistic feedback fairスケジューリングに比べ常に公平性が高くなることになる。Opportunistic feedback fairスケジューリングの閾値毎に見てみると、閾値が低いほうがSTAFIが低く、閾値が高いほうがSTAFIが高くなっていることがわかる。これは閾値が低くなることで多くの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。

また図3の結果から、アクセス確率毎に見るとミニロット数を増やすとSTAFIが高くなる、すなわち公平性が低くなることがわかる。これはミニロット数が増えるにつれて状態が良いMSを選択する回数が増えていることを示している。またミニロット数毎に見てみると、STAFIの最大値はアクセス確率が0.5付近であり、ミニロット数を増やすにつれてアクセス確率が高い方へとずれているのがわかる。これは、アクセス確率とミニロット数の性質が密接に関係しているためである。アクセス確率を上げると状態1のMSを見つける確率が上がりランダム性が下がる、逆に上げ過ぎると衝突が起きやすくなりその結果送信に成功するMSが少なくなりランダム性が上がる。また、ミニロット数を多くすることで1つのミニロットで衝突が起きても他で補うことができるため、衝突を許容できる。この衝突を許容できる数が増える性質はアクセス確率を上げることによる衝突を少なくできる。これらの性質によってアクセス確率を上げてSTAFIが高くなる割合が少なくなり、2つの変数のプラスマイナスがうまく合わさる点が徐々にずれるためである。

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Opportunistic feedback fairスケジューリングを考え、Opportunistic feedback fairスケジューリングの短期間公平性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、閾値と選択回数、ミニロット数とアクセス確率、閾値と観察期間について調査した。

今回のシミュレーションでは正規化SNR値と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てSTAFIの変化を観察した結果からは、Opportunistic feedback fairスケジューリングはRandomスケジューリングより公平性を常に小さくできるという有用性を確認することができた。また、ミニロット数とアクセス確率を変化させた結果から、ミニロット数を増やすとアクセス確率による公平性の上限が変わることがわかった。

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] 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.
- [4] 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.
- [5] T. Tang and R. W. Heath Jr, "Opportunistic feedback for downlink multiuser diversity," *IEEE Communications Letters*, vol.9, no10, pp.948-950, 2005.
- [6] 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.
- [7] G. L. Stüber, *Principles of mobile communication*, 2nd ed., Kluwer, 2001.
- [8] 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.
- [9] 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.