

1FF方式とRR方式を組合わせた 結合スケジューリングの公平性に関する研究

2008MI111 小谷大地 2008MI291 吉村 詩織 2009SE255 清水 龍介

指導教員：石崎 文雄

1 はじめに

近年、携帯電話など無線通信媒体が広く普及することにより無線通信における帯域の利用が増加してきた。帯域を効率的に利用することはQoS(Quality-of-Service)の確保にとって重要である。帯域を効率良く利用するための方法の一つとしてマルチユーザダイバーシチ (multiuser diversity) を利用することが挙げられる [1, 3, 4, 8, 11]。

マルチユーザダイバーシチとは、チャン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それらと比較する際にそれ自身の平均で割ることにより変動の大きいチャンネル容量を比較しやすくするという考え方である。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ン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、その両立が重要である [12]。システム全体のチャン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) スケジューリングである。

本稿では基地局 (BS, BaseStation) と移動局 (MS, Mobile Stations) の通信におけるスケジューリングに着目する。その中でチャンネル容量と公平性の観点からスケジューリング方法に注目すると、代表的なスケジューリング方式として、上記のRRスケジューリング、KHスケジューリングの他にPF(Proportional Fair) スケジューリングなどが挙げられる [5]。3つのスケジューリングにはそれぞれ長所と短所が挙げられる。RRスケジューリングはマルチユーザダイバーシチを利用せずに各MSに順番にサービスを提供する方法である。公平性は非常に優れているが通信速度の善し悪しも考慮せずに提供するためシステム全体のチャンネル容量は低くなる。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に利用し、BSはSNR(Signal-to-Noise Ratio) 値の最も高いMSにサービスを提供する方法である。システム全体のチャンネル容量は最大となるが、平均SNR値の低いMSはサービスを提供されにくいので公平性に深刻な問題がある。このKHスケジューリングの問題を解決するために考え出されたのがPF(Proportional Fair) スケジューリングである。PFスケジューリングは各MSのSNR値をそのMSの平均SNR値で正規化し、正規化されたSNR値の最も高いMSをサービスのために選択する方法である。各MSのSNR値は独立同一分布に従うので各MSがサービスを受ける確率は等しく、長期間の公平性が保証される。またシステム全体のチャンネル容量も、マルチユーザダイバーシチを全く利用していないRRスケジューリングに比べて相

当大きくなる。しかしPFスケジューリングでは各MSが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。

さらにこのPFスケジューリングの欠点を克服するために考案されたのが1FF(One-bit Feedback Fair) スケジューリングと呼ばれる方式である。1FFスケジューリングの特徴として、MSは2状態に量子化した正規化SNR値が任意の閾値を越えていればBSに通知し、BSは閾値を越えたMSをランダムに選択しサービスを行い、さらに各MSが送信する情報は1bitのみに限られるので帯域の消費を減らすことができる。

公平性に関してはスケジューリング期間を有限期間内で考慮した短期間公平性と無限に等しいほどの長さで観察する長期間公平性とに大別できる。短期間公平性と長期間公平性は観察期間の違いのみで、共にスケジューリングがサービス時間などのネットワーク資源を複数のMSにいかにか等しく分配できるかというスケジューリングの能力を表す。短期間公平性は個々のMSのパケット遅延や損失などのパケットレベルの性能に大きな影響を及ぼす [2]。したがって、QoS保証の観点からスケジューリングの短期間公平性の特性を知ることが重要である。短期間公平性を調べるための指標の一つとして、[6]が提案したSTAFI(Statistical Time-Access Fairness Index) と呼ばれる短期間公平性の指標がある。STAFIは有限期間内の2つのMSのサービスされた時間の差の確率分布に着目したものである。

1FFスケジューリングは長期間で見ると非常に優れているが短期間で見た場合同じMSばかり選んでしまい公平性に欠ける恐れがある。その点の改善のために1FFスケジューリングとRRスケジューリングを組み合わせたスケジューリングであれば公平性、チャンネル容量、共にベストにできるのではないかという可能性が見えてきた。本研究では、1FFスケジューリングとRRスケジューリングを組み合わせたスケジューリング方式(本稿では結合スケジューリングと呼ぶ)の短期間公平性の性質を明らかにする。特に短期間公平性評価の指標としてSTAFIを考え、結合スケジューリングのSTAFIをシミュレーションにより調査する。また、この調査結果を1FFスケジューリングの結果と比較する。

2 モデル

本節では、結合スケジューリングの内容と無線通信システムのモデル化、公平性指標の定義を行う。

2.1 結合スケジューリング

結合スケジューリングの内容を特定するためには、フレーム中の何番目のスロットが1FFスケジューリングで

あるか，RR スケジューリングであるのかを決定する必要がある．さらに RR スケジューリングなら何番目の MS へのサービスかを表すことが必要になる．このときフレームの n 番目のスロットでどのようなスケジューリングが行われるかを表したものがサービス列 $\{m_n\}_{n=0}^{T-1}$ である．条件として $m_n = 0$ のときは 1FF スケジューリングが行われ， $m_n > 0$ のときは RR スケジューリングが行われる．特に $m_n > 0$ のときは， m_n 番目の MS へのサービスが行われる．

2.2 システムモデル

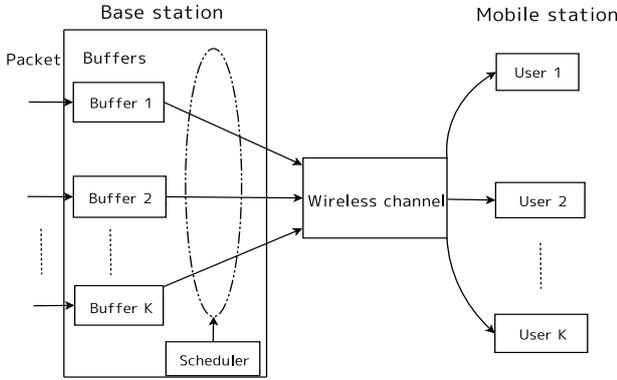


図 1 無線通信システムモデル

本稿では，システムモデルとして図 1 で示されるセルラ無線通信ネットワークを考える．1 つの BS に対して K 個の MS で構成される下り通信（ダウンリンクチャネル）システムによって行う．

単位時間 T_f で分割されてスケジューリングするものとし，時刻 $t(t=0,1,\dots)$ での $MS_i(i=1,\dots,K)$ の正規化 SNR 値を $z^{(i)}(t)$ とする．各 MS の無線チャネル正規化 SNR 値の変化を表す確率過程を $z^{(i)}(t)$ とし，Nakagami- m モデルの一つであるレイリーフェージングチャネルに従って記述できるものとする [10]．

正規化 SNR 値の変化を表す確率過程を有限状態マルコフ連鎖でうまく近似できるものとし，それで近似したモデル [7] について考える．有限状態マルコフ連鎖の状態を $\{0, \dots, N\}$ とし，正規化 SNR 値の境界点である $\{\gamma_n\}_{n=0}^N$ を定める．連続した区間を重複しないように分割する．その結果 $\gamma_0 = 0, \gamma_l < \gamma_{l+1} (l=0, \dots, N), \gamma_{N+1} = \infty$ となる．状態空間にある 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．また有限状態マルコフ連鎖の遷移確率を $P_{i,j} (i, j=0, \dots, N)$ とする．正規化 SNR の状態遷移を自身への遷移もしくは隣接した状態への遷移のみ行うとする．よって二つの連続した状態を跨ぐ遷移の確率は 0 であることから，

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

を得る．次に，隣接した状態の遷移確率について定める．状態が 1 つ上の状態に遷移する条件付き確率は [9]

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

で定められる．状態が 1 つ下の状態に遷移する条件付き確率は

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

で定められる．自身の状態にとどまる条件付き確率は

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

で定められる．また式 (2), (3) にもあるように N_n は正規化 SNR 値が γ_n を横切る率を表している．以下にその式を示す．

$$N = fd \sqrt{2\pi \frac{\gamma}{\bar{\gamma}} \exp(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}})} \quad (5)$$

となり，2 状態マルコフ連鎖の定常状態確率は

$$P_r(0) = 1 - \exp(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}), \quad P_r(1) = \exp(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}) \quad (6)$$

と定めることができる．また 閾値は $\gamma/\bar{\gamma}$ とし fd をドップラー周波数とする．このようにして定められた MS_k の 2 状態マルコフ連鎖を $\{s^{(k)}(t)\}$ で表すものとする．

以上，式 (1)-(6) を用いて有限状態マルコフ連鎖の遷移確率を全て定める．

ここで正規化 SNR 値を 0 と 1 に量子化することによって 2 状態マルコフ連鎖とし，これによってうまく近似されると仮定して式の変形を行うと，正規化 SNR が閾値より上に遷移する確率 (2) は

$$P_{0,1} = \frac{NT_f}{P_r(0)} \quad (7)$$

となる [7]．さらに正規化 SNR が閾値より下に遷移する確率 (3) は

$$P_{1,0} = \frac{NT_f}{P_r(1)} \quad (8)$$

となる [7]．正規化 SNR が自身の状態に留まる確率 (4) における，正規化 SNR 値が閾値より下の範囲に留まる確率は，

$$P_{0,0} = 1 - P_{0,1} \quad (9)$$

となり，正規化 SNR 値が閾値より上の範囲に留まる確率は

$$P_{1,1} = 1 - P_{1,0} \quad (10)$$

となる．(7), (8) 式の値は共に 0 以上 1 以下の定数である．

2.3 公平性指標

本稿では、短期公平性評価の指標として STAFI を利用する。STAFI を定義するために、まず変数をいくつか定義する。\$v(t)\$ は時刻 \$t\$ に 2 状態マルコフ連鎖の状態が 1 にある MS の数を表す。

$$v(t) = \sum_{k=1}^K I(s^{(k)}(t) = 1) \quad (11)$$

ここで \$I(\cdot)\$ は指標関数 (indicator function) を表す。次に \$v(t)\$ を独立で \$[0,1]\$ 上の一様分布に従う確率変数とする。この確率変数を使って \$c^{(1)}(t), c^{(2)}(t)\$ を以下のように定義する。

$$c^{(1)}(t) = \begin{cases} 1 & (s^{(1)}(t) = 1 \nu(t) \in [0, 1/v(t)]) \\ 1 & (v(t) = 0 \nu(t) \in [0, 1/K]) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (12)$$

$$c^{(2)}(t) = \begin{cases} 1 & (s^{(2)}(t) = 1 \nu(t) \in (s^{(1)}/v(t), (s^{(1)}(t) + 1)/v(t))) \\ 1 & (v(t) = 0 \nu(t) \in (1/K, 2/K)) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (13)$$

このようにして定義された \$c^{(i)}(t) (i=1,2)\$ は、MS \$i\$ が時刻 \$t\$ にサービスされるならば \$c^{(i)} = 1\$、そうでなければ \$c^{(i)} = 0\$ となる確率変数となる。この \$c^{(i)}(t)\$ を使用して、MS \$i\$ の期間 \$[t_0, t_0+n]\$ における累積サービス時間 \$\alpha^{(i)}(t_0, t_0+n) (i = 1, 2)\$ は

$$\alpha^{(i)}(t_0, t_0 + j) = \sum_{t=t_0}^{t_0+j-1} c^{(i)}(t) \quad (14)$$

のように表すことができる。ここで STAFI は以下のように定義される。

$$G_j(x) = P(|\alpha^{(1)}(t_0, t_0 + j) - \alpha^{(2)}(t_0, t_0 + j)| \leq x) \quad (15)$$

\$x\$ は指標を表す数で \$G_j(x)\$ は \$x\$ 以上になる確率を示し、各 MS の割り当ての差である。この値が小さい程ユーザー間の公平性は高いことがいえる。

3 シミュレーション

シミュレーションは、各 MS の定常状態を擬似乱数を用いて定め、遷移確率に従って状態を遷移させる。擬似乱数の発生には GSL(GNU Scientific Library)[13] の乱数発生器 (ranlux) を用いた。本節のシミュレーションでは以下のような環境を設定した。第 2 章で述べたように、レイリーフェージングチャネルを使用し \$m = 1\$ とする。\$T_f = 0.001\$ sec, ドップラー周波数 \$f_d = 10\$ Hz として変化させる。STAFI の指標の値 \$x = 40\$, タイムスロット数 \$n = 256\$ 回, 各 MS の割り当ての差を求める回数を \$10^6\$ 回とする。また今回, MS の数 \$K\$ を 20, 30, 40 と変化させる。また, 閾値が 3.78dB の時に 1FF スケジューリングにおけるチャンネル容量が最大になることから, 閾値 \$\gamma/\bar{\gamma}\$ [dB] を 2.00, 3.78, 6.00 と変化させ結果の比較を行う。遷移確率を第 3 節の結果を元に求め, 表 1 に示す。

表 1 遷移確率

閾値 [dB]	\$P_{00}\$	\$P_{01}\$	\$P_{10}\$	\$P_{11}\$
2.00	0.991684	0.008136	0.031557	0.968443
3.87	0.996083	0.003917	0.038734	0.961266
6.00	0.999049	0.000951	0.050014	0.949986

表 1 の結果より, 刻一刻変わる通信状態において 0 から 0, 1 から 1 に遷移する確率は, 0 から 1, 1 から 0 に遷移する確率に比べてはるかに高く, 閾値を変えた場合もその傾向は変わらないことが分かった。0 か 1 での判断になるため, 極短い時間においてはいきなり閾値を越えるということは少なく, 01, 10 の遷移確率が低くなっていると考えられる。

STAFI の指標である \$x\$ を 40 に固定しシミュレーションにより推定した結合スケジューリングの STAFI を表 2 に示す。シミュレーションは \$10^6\$ 個のサンプルを取り, STAFI の推定を行った。表 2 に示した STAFI の推定値は, シミュレーションによって得られた推定値 100 個の平均値を示している。同様に 1FF スケジューリングの STAFI を表 3 に示す。

表 2 結合スケジューリングのシミュレーション結果 (STAFI の指標値 \$x=40\$)

条件 (閾値 [dB], MS の数)	STAFI の推定値における 95%信頼区間
(2.00, 20)	\$2.06 \times 10^{-2} \pm 2.27 \times 10^{-5}\$
(3.78, 20)	\$6.74 \times 10^{-2} \pm 5.37 \times 10^{-5}\$
(6.00, 20)	\$3.67 \times 10^{-2} \pm 3.64 \times 10^{-5}\$
(2.00, 30)	\$0.15 \times 10^{-2} \pm 7.96 \times 10^{-6}\$
(3.78, 30)	\$2.66 \times 10^{-2} \pm 3.31 \times 10^{-5}\$
(6.00, 30)	\$3.06 \times 10^{-2} \pm 3.03 \times 10^{-5}\$
(2.00, 40)	\$0.01 \times 10^{-2} \pm 1.27 \times 10^{-6}\$
(3.78, 40)	\$0.92 \times 10^{-2} \pm 1.95 \times 10^{-5}\$
(6.00, 40)	\$2.55 \times 10^{-2} \pm 3.14 \times 10^{-5}\$

表 3 1FF スケジューリングのシミュレーション結果 (STAFI の指標値 \$x=40\$)

条件 (閾値 [dB], MS の数)	STAFI の推定値における 95%信頼区間
(2.00, 20)	\$2.38 \times 10^{-2} \pm 2.90 \times 10^{-5}\$
(3.78, 20)	\$8.43 \times 10^{-2} \pm 5.74 \times 10^{-5}\$
(6.00, 20)	\$4.47 \times 10^{-2} \pm 3.81 \times 10^{-5}\$
(2.00, 30)	\$0.18 \times 10^{-2} \pm 9.14 \times 10^{-6}\$
(3.78, 30)	\$3.50 \times 10^{-2} \pm 3.75 \times 10^{-5}\$
(6.00, 30)	\$3.73 \times 10^{-2} \pm 3.16 \times 10^{-5}\$
(2.00, 40)	\$0.01 \times 10^{-2} \pm 2.12 \times 10^{-6}\$
(3.78, 40)	\$1.30 \times 10^{-2} \pm 2.50 \times 10^{-5}\$
(6.00, 40)	\$3.10 \times 10^{-2} \pm 3.40 \times 10^{-5}\$

表 2 より閾値 [dB]=2.00, 3.78, 6.00 において, \$K=20\$, 3.78dB の時に, STAFI の値が最大となることが分かる。今回設定したどの閾値の場合においても MS の数を 20 から 40 に増加させた場合、閾値 6.00 の場合, MS の増加によって約 31.2%, 閾値 3.78 の場合, 約 86.1%, 閾値 2.00 の場合, 約 99.7% STAFI の推定値が小さくなっている。この結果から閾値が低いほど MS の数による影響を受けると考えられる。

次に表3より, このシミュレーションにおいて, 閾値6.00の場合, MSの数を20から40に増加させることにより約30.6%, 閾値3.78の場合, 約84.6%, 閾値2.00の場合, 約99.5%公平性が高くなっている. この結果から, 1FFスケジューリングの場合でも閾値が低いほどMSの数による影響を受けると考えられる. この結果を表2の結果と比較すると, 結合スケジューリングは1FFスケジューリングにRRスケジューリングを組み込ませているので, 閾値の変化によるMSの選択は1FFスケジューリングの方が多くなることが予想できた. しかし, 閾値の変化に伴うSTAFIの変化率に大きな違いはなく, 全体として結合スケジューリングの方がSTAFIの推定値が小さくなることを見て取れる.

表2, 3より, STAFIの推定値における95%信頼区間が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非常に信頼性が高いと言える.

4 まとめ

本稿ではマルチユーザダイバーシティを利用したスケジューリングのチャンネル容量と公平性の間のバランスについて着目し, 結合スケジューリングの短期間公平性に関する研究を行った. 正規化SNR値の変化を表す確率過程はレイリーフェージングチャンネルを採用し2状態の有限マルコフ連鎖で近似されるものとした. 短期間公平性を評価する指標としてSTAFIを導入し, 疑似乱数を用いた定常状態を定め, 遷移状態におけるSTAFIの推定値をシミュレーションにより調査を行った. 閾値とMSの数を変化させ比較し, STAFIの推定値の変化を監査した. その結果, 以下のことが考察できた.

- MSの数が少ない場合は通信容量と公平性のトレードオフの影響を強く受け, MSの数が多いほど閾値が高いことによる影響を強く受ける.
- MSの数が増加する程公平性は高くなる.
- 閾値が低いほどMSの数による影響を強く受ける.
- 閾値を高く設定することにより長期的な高い公平性を確保できるが, 短期間公平性に深刻な問題が発生する可能性がある. 反対に閾値を低く設定することにより公平性はRR方式に近づくが, 同時に通信容量は低下する.

参考文献

[1] D. Gesbert and M.-S. Alouini, "How much feedback is multi-user diversity really worth?," *Proc. of IEEE ICC '04*, pp.234-238, 2004.

[2] G. U. Hwang and F. Ishizaki, "Analysis of short term fairness and its impact on packet level performance," *Performance Evaluation*, Vol.67, No.12, pp.1340-1352, 2010.

[3] 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, No.5, pp.3220-3227, 2007.

[4] H. Kim and Y. Han, "An opportunistic channel quality feedback scheme for proportional fair scheduling," *IEEE Communications Letters*, Vol.11, No.6, pp.501-503, 2007.

[5] 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.

[6] Y. Liu, S. Gruhl and E. W. Knightly, "WCFQ: an opportunistic wireless scheduler with statistical fairness bounds," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.2, No.5, pp.1017-1028, 2003.

[7] 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, No.3, pp.1142-1153, 2005.

[8] X. Qin and R. Berry, "Exploiting multiuser diversity for medium access control in wireless networks," *Proc. of IEEE INFOCOM '03*, pp.1084-1094, 2003.

[9] J. Razavilar, K. J. R. Liu and S. I. Marcus, "Jointly optimized bit-rate/delay control policy for wireless packet networks with fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.50, No.3, pp.484-494, 2002.

[10] G. L. Stiiuber, *Principles of mobile communication*, 2nd ed., Kluwer, 2001.

[11] D. Wu and R. Negi, "Utilizing multiuser diversity for efficient support of quality of service over a fading channel," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol.54, No.3, pp.1198-1206, 2005.

[12] L. Yang, M. Kang and M.-S. Alouini, "On the capacity-fairness tradeoff in multiuser diversity systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol.56, No.4, pp.1901-1907, 2007.

[13] B. Gough, F. Rossi, G. Jungman, J. Davies, J. Theiler, M. Booth, M. Galassi, *GNU Scientific Library*, Vol.1 No.8, pp.145-159, 2006.

[14] 石井佑美香, 岡崎実加, 安江佐織, "1FFスケジューリングの公平性に関する研究" 南山大学 数理情報学部 情報通信学科 2011年度卒業論文要旨集.