

# QPF スケジューリングの公平性に関する研究

2006MI105 水野 喬之

2006MI115 中内 芳朗

2006MI188 虎山 雄哉

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ティ (multiuser diversity) 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ティは、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、任意の時間で一部のユーザがほかのユーザに比べて良好なチャンネル利得を持つことから発生するダイバーシティである。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、その両立が問題となっている [5]。そ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ティを全く利用せず、ユーザのチャン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ティを利用しないため、システム全体のチャンネル容量は低い、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ティ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ン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ン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 [5]。

サービス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、正規化された SNR 値の最も高い MS をサービスのために選択する。各ユーザの正規化された SNR 値は独立同一分布 (i.i.d.) 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ンネル容量も、マルチユーザダイバーシティを全く利用しない

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) に正規化された 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、正規化された 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 [2, 3]。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ンネル容量を達成できることが知られている [4]。また、QPF 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ティ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。特に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。

本研究では、QPF スケジューリングの短期間公平性についてシミュレーションにより調査する。短期間公平性を評価するための評価指標として FI(Fairness Index)[5] のサンプルパスバージョンである SFI(Sample-path version of FI) を考え、SFI の時間による変化を観察する。

## 2 モデル

### 2.1 システムモデル

本研究で考えるシステムモデルとして、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 QPF 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

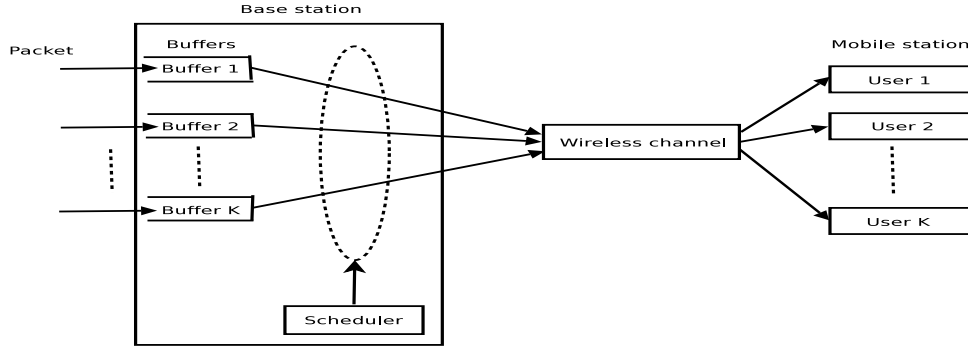


図1 システムモデル

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された SNR 値の変化を表わす確率過程  $\{z^{(i)}(t)\}$  は、Nakagami-m モデル [6] で記述することが出来るものとする。さらに、文献 [7] で示されたように、この確率過程は有限状態マルコフ連鎖でうまく近似できるものとする。

以下で、[7] 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、正規化された 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、隣接した状態の遷移確率は、現在の状態から 1 つ上の状態に上がる場合の遷移確率は、

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

で、現在の状態から 1 つ下の状態に下がる場合の遷移確率は

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

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 が  $\gamma_n$  を横切る率を表わしており、以下の式で与えられる。

$$N_n = \frac{\sqrt{2\pi}f_d}{\Gamma(m)} \left(\frac{m\gamma_n}{\bar{\gamma}}\right)^{m-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{m\gamma_n}{\bar{\gamma}}\right) \quad (5)$$

ここに、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 を表わし、 $\Gamma(m) = \int_0^\infty t^{m-1} \exp(-t) dt$  はガンマ関数である。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わしており、

$$P_r(n) = \frac{\Gamma(m, m\gamma_n/\bar{\gamma}) - \Gamma(m, m\gamma_{n+1}/\bar{\gamma})}{\Gamma(m)} \quad (6)$$

で与えられる。ここで、 $\Gamma(m, x) = \int_x^\infty t^{m-1} \exp(-t) dt$  は第 2 種不完全ガンマである。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 FI のサンプルバージョンである SFI を考える。

FI を定義する前に、まず各ユーザの自己公平性 (self-fairness)  $f_i$  ( $i = 1, \dots, K$ ) を以下のように定義する。

$$f_i = -\frac{\log(P_i)}{\log K} \quad (7)$$

ここに、 $K$  は MS の数を表わし、 $P_i$  は MS  $i$  が選ばれる定常確率、すなわち全体の中で MS  $i$  の伝送のために割り当てられる時間の割合を表わす。式 (7) を使って FI は以下のように定義される。

$$\begin{aligned} \text{FI} &= \sum_{i=1}^K P_i f_i \\ &= -\frac{\sum_{i=1}^K P_i \log P_i}{\log K} \end{aligned} \quad (8)$$

式 (8) は、各 MS が等確率で選ばれるスケジューリングのエントロピーに対して考えているスケジューリングのエントロピーの比と考えることができる。したがって、エントロピーの性質から  $0 \leq \text{FI} \leq 1$  であることが分かる。

次に、SFI を定義する。そのために  $\{1, \dots, K\}$  上の確率過程  $\{X(t)\}$  を定義する。ここに、 $X(t)$  は時刻  $t$  においてサービスのために選ばれた MS のインデックスを示す。さらに  $P_i^*(t)$  ( $i = 1, \dots, K; t = 0, 1, \dots$ ) を以下のように定義する。

$$P_i^*(t) = \frac{1}{t} \sum_{n=0}^{t-1} I_{\{X_n=i\}} \quad (9)$$

ここに  $I$  は指標関数 (indicator function) を表わし、

$$I_{\{X_n=i\}} = \begin{cases} 1 & (X_n = i) \\ 0 & (X_n \neq i) \end{cases} \quad (10)$$

である。ここで、式 (9) は時刻  $t$  までに MS  $i$  がサービスのために選ばれた割合を表わし、エルゴード性の仮定のもとで確率 1 で

$$P_i = \lim_{t \rightarrow \infty} P_i^*(t) \quad (11)$$

となることに注意。このとき、時刻  $t$  における SFI  $\text{SFI}(t)$  ( $t = 0, 1, \dots$ ) は以下のように定義される。

$$\text{SFI}(t) = - \frac{\sum_{i=1}^K P_i^*(t) \log P_i^*(t)}{\log K} \quad (12)$$

ここで、エルゴード性の仮定のもとで確率 1 で

$$\text{FI} = \lim_{t \rightarrow \infty} \text{SFI}(t) \quad (13)$$

となることに注意。

### 3 シミュレーション結果

本節では、QPF スケジューリングの SFI  $\text{SFI}(t)$  をシミュレーションによって調べ、QPF スケジューリングの短期間公平性について論じる。QPF スケジューリングの FI は 1 であるので、時間の経過にともない SFI がどのような速さで、どのような形で 1 に近づくかを観察する。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。MS の数  $K$  は 20 とし、各 MS の無線チャンネルは Nakagami-m モデルにおいて  $m = 1$  と設定したモデルで記述できるとする。すなわち、各 MS の無線チャンネルは Rayleigh fading モデルで記述できるとする。また、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  $N = 1$  とし、 $\bar{\gamma} = 20\text{dB}$  とする。また QPF スケジューリングの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  $\gamma_1$  (SNR 値) の値を変化させることによって時間変化がどう変わるかを調べる。このとき有限状態マルコフ連鎖の遷移確率を 2 節の結果を使って求めると、例として以下ようになる。

$$\gamma_1 = 1\text{dB}$$

$$P_{0,0} = 0.501177, \quad P_{0,1} = 0.498823 \\ P_{1,0} = 0.005013, \quad P_{1,1} = 0.994987$$

$$\gamma_1 = 20\text{dB の時}$$

$$P_{0,0} = 0.970824, \quad P_{0,1} = 0.027176 \\ P_{1,0} = 0.050133, \quad P_{1,1} = 0.949867$$

上記の設定で、QPF スケジューリングの SFI を 0msec から 10000msec までシミュレーションによって求めたものを図 2 に示す。図の x 軸を時間 (msec)、y 軸を SFI とする。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) [8] の乱数発生器を利用し、図 2 には ranlux を利用した。シミュレーションによる推定値は 100 個のサンプルのサンプル平均により得て、その推定値の 5 個のサンプル平均をシミュレーション結果として図 2 に示している。図 2 は  $\gamma_1 = 1\text{dB}$  である。また表 1 に、ranlux を用いた時の 5 個の推定値の分散を、時間 (msec) を 2000, 4000, 6000, 8000, 10000 に関して示す。

図 2 から SFI は 10sec 程度でほぼ 1 に収束することが分かる。また 4sec 程度で 0.5 を超えることも分かる。また、他の 5 つのサンプルも近似したシミュレーション結果を得られたことから、シミュレーションに信頼性があると考えられる。これは、他の  $\gamma_1$  でも同様の結果が得られた。

表 1 推定値分散 ( $10^{-11}$ )

時間	推定値分散：1(dB)	推定値分散：20(dB)
2000	0.510893502	12.605797323
4000	0.040208367	10.242271304
6000	0.074670567	11.003962523
8000	0.087509793	16.812579396
10000	0.072892097	21.017735829

表 1 から、各時間帯で平均 SNR の推定値の分散が非常に小さい。つまり、このシミュレーション結果による推定の信頼性が高いと確認できる。また、他の 4 個の乱数発生器や他の  $\gamma_1$  でも表 1 のように、非常に小さい結果を得ることも確認できている。

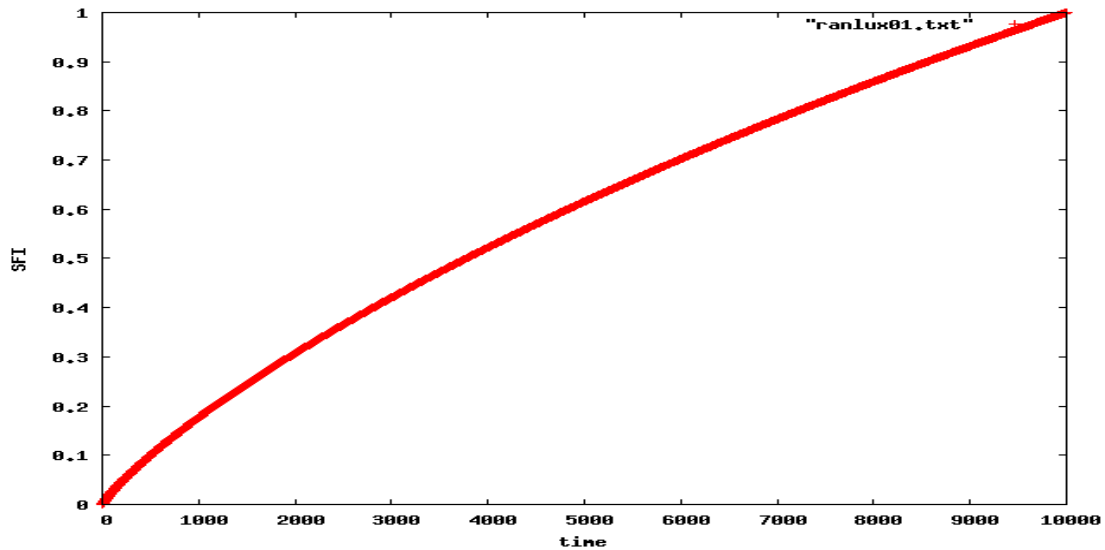


図2 SFI:ranlux-1

## 4 おわりに

### 4.1 まとめと研究結果

本研究では，マルチユーザダイバーシチを利用した QPF スケジューリングを考え，QPF スケジューリングの短期間公平性について調べた．QPF スケジューリングを使用した時の短期間公平性が PF スケジューリングのそれとほとんど変わらない性能を持っているのであれば，PF スケジューリングよりも帯域が少なく，使用電力が大幅に少なく済ませることができる QPF スケジューリングが実用上望ましい．本研究では，短期間公平性を評価する指標として SFI を導入し，SFI の時間変化をシミュレーションにより調べた．シミュレーション結果から，QPF スケジューリングにおいては SFI は 10sec 程度でほぼ 1 に収束すること，また時間の経過とともにほとんど確実に理想的な状態に収束して行くことが分かった．また，時間変化を調べるために，さまざまな状態でシミュレーションを行ってみた．SNR 値をさまざまな値で変化させ，時間変化を調べたところ，すべての状態がほぼ近似した結果を示していた．つまり，QPF スケジューリングは時間変化はあまり変化することがなく，どんな状態でも公平性を持つことが確認できた．

### 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. 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.

[3] F. Ishizaki and G. U. Hwang, "Throughput performance of quantized proportional fair scheduling with adaptive modulation and coding," *Proc. of Wireless Telecommunication Symposium*, 2009.

[4] G. U. Hwang and F. Ishizaki, "Design of a fair scheduler exploiting multiuser diversity with feedback information reduction," *IEEE Communications Letters*, Vol.12, No.2, pp.124–126, 2008.

[5] L. Yang, M. Kang and M.-S. Alouini, "On the capacity-fairness tradeoff in multiuser diversity systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.56 No.4, pp.1901–1907, 2007.

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

[7] Q. Liu, S. Zhou and G. B. Giannakis, "Queuing with adaptive modulation and coding over wireless links: cross-layer analysis and design," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.4 No.3, pp.1142–1153, 2005.

[8] 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.