

無線通信網のパケット・スケジューリングの公平性に関する研究

2009SE152 真下 知恵 2009SE214 野本 貴嗣
2009SE280 田中 俊行 2009SE288 塚崎 啓義
指導教員: 石崎 文雄

1 はじめに

1.1 研究背景

近年、携帯電話やスマートフォンなどの無線通信媒体の急激な普及により無線通信における帯域の利用が増加してきたため、無線通信網の通信量が増えることによる通信の不具合が発生している。

無線通信において帯域は最も貴重な資源の一つであり、帯域の効率的な利用はQoS(Quality-of-Service)の確保にとって重要である。このことから、効率的な通信帯域の使用法が注目されており、その方法の一つとしてマルチユーザダイバーシチ(multiuser diversity)を利用する方法が挙げられる。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、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ンネル利得を持つことから発生するダイバーシチのことである。

マルチユーザダイバーシチを利用することでシステム全体のチャンネル容量を増加させることができるため、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の研究が盛んに行われてきている[1,2,3,7,10]。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いては、システム全体のチャンネル容量と個々のユーザの公平性の間にトレードオフが存在することが知られている。したがって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いては、チャンネル容量と公平性の間のバランスのとれたスケジューリングを開発することが重要である。

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。公平性は、短期公平性(short-term fairness)と長期公平性(long-term fairness)に分類することができる。短期公平性は、スケジューリングが有限期間内に、一方長期公平性は、スケジューリングが無期限期間内に通信時間などのネットワーク資源を複数の移動局(MS, Mobile Station)にいかにか等しく分配できるかというスケジューラ能力を表す。短期公平性は、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、たとえ長期公平性が達成されていても短期公平性が不十分なスケジューリング方式は、各ユーザの性能に深刻な問題を発生させることになる。

2 スケジューリング方式

本稿ではセルラ通信網を想定し、基地局(BS, Base-Station)と MS の下りの通信(ダウンリンク)におけるスケジューリングに着目する。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式に着目すると、代表的なスケジューリング方式として RR(Round-Robin)方式と KH(Knopp and Humblet)方式[4]がある。

RR 方式はマルチユーザダイバーシチをまったく利用せず、MS のチャンネル状態とは無関係に、各 MS に順番

に通信が行われ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 方式はマルチユーザダイバーシチを最大限に利用しているスケジューリングである。KH 方式においては、BS は常に最も SNR(Signal-to-Noise Ratio)値の高い MS に通信が行われるので、システム全体のチャンネル容量は最大となる。しかし、平均 SNR 値の低い MS は通信されにくいので、MS 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。

通信全体のチャンネル容量と MS 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考え出されたのが PF(Proportional Fair)方式である。PF 方式は各 MS の SNR 値をその MS の平均 SNR 値で正規化し、正規化 SNR 値の最も高い MS を通信のために選択する。各 MS の正規化 SNR 値は独立同一分布(independent and identically distributed)に従うので、各 MS に通信が行われる確率は等しく、MS 間の長期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 方式に比べて相当大きくなることが知られている。しかし、PF 方式では各 MS が BS に正規化 SNR 値を通知しなければならず、そのために帯域と MS の電力の消費が激しいという欠点がある。

PF 方式の欠点を克服するために 1FF(One-bit Feedback Fair)方式が考え出された。この方式では、MS は 2 状態に量子化した正規化 SNR 値が任意の閾値を超えていれば BS に 1bit の情報を通知する。BS は閾値を超えた MS をランダムに選択し、通信を行う。各 MS は 1bit のみ BS に通知するので帯域の消費を減らすことができる。しかし MS の数が増えると消費帯域が増えるという欠点がある。

MS の数が増えるとフィードバックによる消費帯域が増えるという 1FF 方式の持つ欠点を改良したものが OFF(Opportunistic Feedback Fair)方式である[2]。OFF 方式では、フィードバックのためにミニスロットを利用する。この方式では、各 MS は各々の正規化 SNR 値が定めた閾値を超えているか判断し、超えたものはアクセス確率 P でミニスロットに送信する。送信された MS が 2 つ以上の場合は、その送信は失敗する。この様子を図 1 に示す。ミニスロットの個数回このような試行が行われた後、送信された情報の中から 1 個を選び、その情報を持つ MS に通信が行われる。もしミニスロットに送信された情報がなければ、全 MS から 1 つランダムに選び通信が行われる。

本稿では、OFF スケジューリングの持つ短期公平性の性質を明らかにする。短期公平性について調査する指標の 1 つとして STAFI(Statistical Time-Access Fairness Index) [5]と呼ばれるものがある。STAFI は、有限期間内の 2 つの移動局の通信された時間の差の確率分布に着目したものである。本研究では、シミュレーションにより

STAFI の値を推定することにより OFF 方式の短期公平性の性質を調べる。

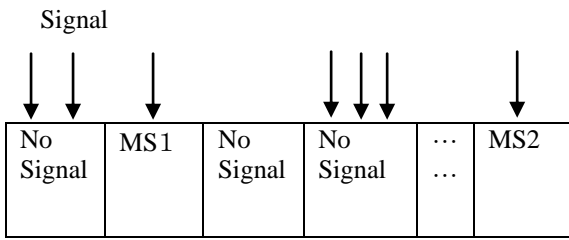


図1 ミニスロット

3 モデル

本節では、OFF 方式のシステムのモデル化と公平性指標の定義について説明する。

3.1 システムモデル

本稿では、システムモデルとして図2で示されるセルラ無線通信ネットワークを採用する[6]。1つのBSに対して K 個のMSで構成されるダウンリンクチャネルシステムをOFF方式によって行う。BSからMSへの通信は、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 $t (t = 0, 1, \dots)$ における $MS_i (i = 1, \dots, K)$ の正規化SNR値を $z^{(i)}(t)$ とする。今回のモデル化において各MSの正規化SNRの状態は任意に定めた閾値と閾値の間のどの状態空間に存在するかで考えられる。各MSの正規化SNR値の状態変化を表す確率過程を $\{z^{(i)}(t)\}$ とし、Nakagami- m モデルの1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]。また正規化SNR値の状態の変化を表す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。

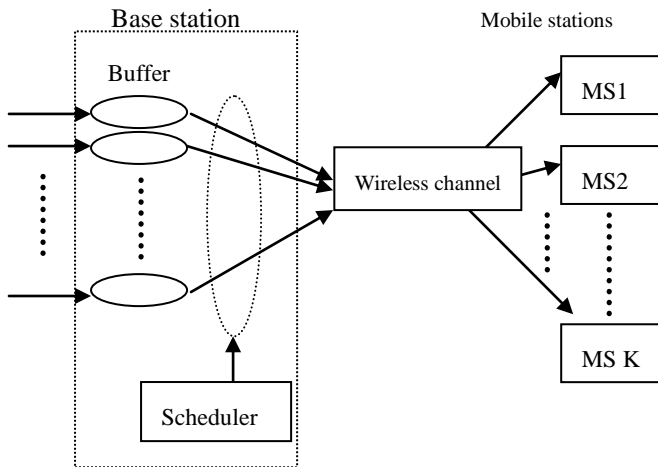


図2 無線通信ネットワークのシステムモデル

次に、正規化SNR値の変化を表す確率過程の有限状態マルコフ連鎖で近似したモデル[7]について考える。有限状態マルコフ連鎖の状態空間を $\{0, \dots, N\}$ とし、正規化SNR値の境界点である $\{\gamma_n\}_{n=0}^N$ を定め、連続した空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値が状態遷移を自身もしくは隣接した状態への遷移のみを行うとする。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

$$P_{l,n} = 0, |l - n| \geq 2 \quad (3.1)$$

を得る。

次に、隣接した状態へ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

$$P_{n,n+1} = \frac{N_{n+1}T_f}{P_r(n)}, (n = 0, \dots, N-1) \quad (3.2)$$

で定められる。状態が1つ上の状態に遷移する条件付き確率は

$$P_{n,n-1} = \frac{N_{n-1}T_f}{P_r(n)}, (n = 0, \dots, N-1) \quad (3.3)$$

で定められる。自身の状態に留まる条件付き確率は

$$P_{n,n} = \begin{cases} 1 - P_{n,n+1} - P_{n,n-1}, & (0 < n < N) \\ 1 - P_{0,1}, & (n = 0) \\ 1 - P_{N,N-1}, & (n = N) \end{cases} \quad (3.4)$$

で定められる。また(3.2)(3.3)にあるように N_n は正規化SNR値が γ_n を横切る率を表している。ここで、平均SNR値を $\bar{\gamma} = E[\gamma]$, ガンマ関数を $\Gamma(m) = \int_0^\infty t^{m-1} \exp(-t) dt$ で表す。また $m\gamma_n/\bar{\gamma}$ は閾値とし fd をドップラー周波数とする。

前述のように各MSの無線チャネルはレイリーフェージングチャネルに従うため $m = 1$ と定める。さらに、正規化SNR値を0と1に量子化することで2状態の有限マルコフ連鎖とし、これによってうまく近似されると仮定すると、正規化SNR値が閾値より上に遷移する確率(3.2)は

$$P_{0,1} = \frac{NT_f}{P_r(0)} \quad (3.5)$$

正規化SNRが閾値より下に遷移する確率(2.3)は

$$P_{1,0} = \frac{NT_f}{P_r(1)} \quad (3.6)$$

正規化SNR値が自身の状態に留まる確率(2.4)における、閾値より下の範囲に留まる確率は

$$P_{0,0} = 1 - P_{0,1} \quad (3.7)$$

閾値より上の範囲で留まる確率は

$$P_{1,1} = 1 - P_{1,0} \quad (3.8)$$

正規化SNR値が γ_n を横切る率は

$$N = fd \sqrt{2\pi \frac{\gamma}{\bar{\gamma}}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \quad (3.9)$$

2状態の有限マルコフ連鎖の定常状態確率は

$$P_r(0) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\nu}\right) \quad (3.10)$$

$$P_r(1) = \exp\left(-\frac{\gamma}{\nu}\right) \quad (3.11)$$

と定めることができる。また閾値は $\frac{\gamma}{\nu}$ となる。このようにして定められたMS k の2状態の有限マルコフ連鎖を $\{s^{(k)}(t)\}$ と表すものとする[11]。

3.2 公平性指標

本稿では、短期公平性を評価する指標として STAFI を利用する。STAFI を定義するために、まずいくつかの変数を定義する。

$$V(t) = \sum_{k=1}^K I(s^{(k)}(t) = 1) \quad (3.12)$$

ここで $I(\cdot)$ は指標関数を表す。従って、 $v(t)$ は時刻 t に2状態の有限マルコフ連鎖の状態が1にあるMSの数を表す。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と、この確率変数を使用し、 $\{c^{(1)}(t)\}$ 、 $\{c^{(2)}(t)\}$ を以下のように定義することができる。

$$c^{(1)}(t) = \begin{cases} 1 & (s^{(1)}(t) = 1, v(t) \in [0, 1/V(t)]) \\ 1 & (V(t) = 0, v(t) \in [0, 1/k]) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.13)$$

$$c^{(1)}(t) = \begin{cases} 1 & (s^{(2)}(t) = 1, v(t) \in [s^{(1)}(t)/v(t), (s^{(1)}(t) + 1)/v(t)]) \\ 1 & (v(t) = 0, v(t) \in [1/k, 2/k]) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.14)$$

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 $c^{(i)}(t) = 1$ 、そうでなければ $c^{(i)}(t) = 0$ となる確率変数である。この $c^{(i)}(t)$ を利用して、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

$$\alpha^{(i)}(t_0, t_0 + n) = \sum_{t=t_0}^{t_0+n-1} c^{(i)}(t) \quad (3.15)$$

と表すことができ、STAFIは(3.16)で定義できる。

$$G_n(x) = P(|\alpha^{(1)}(t_0, t_0 + n) - \alpha^{(2)}(t_0, t_0 + n)| \geq x) \quad (3.16)$$

x は指標を表す数で $G_n(x)$ は x 以上になる確率を示しており、 $\alpha^{(1)}$ はMS1が割り当てられた回数、 $\alpha^{(2)}$ はMS2が割り当てられた回数を表している。よって(3.16)の値が小さいほどユーザ間の公平性は高いと言える。

4 シミュレーション結果

本節では、OFF方式の短期公平性の調査するために行ったシミュレーションについて説明する。

4.1 シミュレーション

本節ではOFF方式を利用した短期公平性についてのシミュレーションの結果について述べる。シミュレーション

は、擬似乱数を用いて各MSの定常状態を定め、(3.5)-(3.8)によって与えられる遷移確率(表4.1)によって状態を遷移させる。シミュレーションにおける擬乱数の発生にはGSL(GNU Scientific Library)[13]の乱数発生器を用いた。

本研究のシミュレーションでは以下のような環境を設定した。単位時間を0.001sec、すなわち $T_f = 0.001$ とし、ドップラー周波数を10Hz、すなわち $fd = 10$ 、タイムスロット数を256、すなわち $n = 256$ 、各MSの割り当ての差を求める回数を 10^5 回とする。今回、MSの数を20, 30, 40個、すなわち $K = 20, 30, 40$ 、アクセス確率を0.3, 0.6, 0.9、すなわち $P = 0.3, 0.6, 0.9$ と変化させる。また、閾値を2.00, 4.00, 6.00 dB、すなわち $\frac{\gamma}{\nu} = 2.00, 4.00, 6.00$ dBと変化させて結果の比較を行う。また、STAFIの基準値 x をMSの数に合わせて(MSの数, STAFIの基準値)={(20, 4), (30, 3), (40, 2)}と変化させる。

表4.1 遷移確率

閾値 \ 遷移確率	P _{0,0}	P _{0,1}	P _{1,0}	P _{1,1}
2.00	0.9918	0.0081	0.0315	0.9684
4.00	0.9960	0.0039	0.0387	0.9612
6.00	0.9990	0.0009	0.0500	0.9499

上述の設定における遷移確率(3.5)-(3.8)の値を表4.1に示す。表4.1の値を用いて、シミュレーションプログラムを作成する。MSの数、閾値、アクセス確率を変えてシミュレーションを行った結果得られたSTAFIの推定値を表4.2-4.4に示す。

表4.2 MSの数が20個の場合でのシミュレーション結果 (STAFIの基準値 $x = 4$)

アクセス確率 \ 閾値	0.3	0.6	0.9
2.00	0.1849	0.1735	0.1398
4.00	0.1639	0.1527	0.1570
6.00	0.1234	0.1236	0.1234

表4.3 MSの数が30個の場合でのシミュレーション結果 (STAFIの基準値 $x = 3$)

アクセス確率 \ 閾値	0.3	0.6	0.9
2.00	0.2436	0.3555	0.2038
4.00	0.2556	0.2206	0.2266
6.00	0.1977	0.1977	0.1970

表 4.4 MS の数が 40 個の場合でのシミュレーション結果
(STAFI の基準値 $x = 2$)

アクセス確率 閾値	0.3	0.6	0.9
2.00	0.4457	0.6939	0.4996
4.00	0.5314	0.4767	0.4595
6.00	0.4093	0.4077	0.4064

表 4.2-4.4 より、アクセス確率 $P = 0.3$ の場合に閾値が 6.00dB と 2.00dB の場合を比べると、閾値が 6.00dB の場合の方が、STAFI の値が高いことがわかる。これは閾値が 6.00dB と高い値であることから、多くの場合で全 MS が状態 0 に存在しており、全ての MS が等しく採用される傾向にあるためであると考えられる。アクセス確率が $P = 0.6, 0.9$ の場合も同様であり、閾値が 2.00, 4.00dB の場合よりも、6.00dB の場合のほうが公平性は高くなる。しかし閾値が 6.00dB の場合は、公平性は良いものの OFF 方式が正しく動作しているとは言えず、どちらかと言うと RR 方式に近い形になっている。したがって、トレードオフの関係から公平性は高くなることが予想されるが、通信帯域を上手く使えているとは言えないだろう。

また、アクセス確率 0.9 の場合、MS の数が 20, 30, 40 のどの場合であろうと、閾値の変化による STAFI の値の増加率が 25% 以下となり、グラフも横ばいに近い形となる(本稿の図 4.9 参照)という結果も得た。

これは、アクセス確率が高いため、MS がミニスロットに送信される確率が低くなることにより、ランダムに選ばれる可能性が高くなるためだと考えられる。

最後に STAFI の値の推定値の分散を求めた結果を示す。表 4.2-4.4 において示したシミュレーションによって得られた STAFI の推定値の中からいくつかを選び、その推定値の分散を表 4.5 に示す。表 4.5 より、シミュレーションによって得られた STAFI の推定値の分散は、いずれも推定値に比べて非常に小さいことがわかる。このことから、シミュレーションによって得られた推定値は信頼性が高いと言える。

表 4.5 推定値分散(10^{-7})

(MS の数, 閾値, アクセス確率)	推定値分散
(20, 2.00, 0.3)	2.2839
(30, 4.00, 0.6)	2.7214
(40, 6.00, 0.9)	2.0515

5 おわりに

MS を遷移確率により遷移させた際の STAFI の値をシミュレーションにより調査した。閾値と MS の数、アクセス確率を変化させて、STAFI の値の変化を観察した。その結果、以下の事が判明した。

1. 閾値が高いほど、アクセス確率の影響を受けづらく公平性は安定した。
2. MS の数が少ないほどミニスロットへの送信が失敗する

確率が高い。

3. アクセス確率が $P = 0.3, 0.9$ の場合は、 $P = 0.6$ の場合に比べミニスロットに送信が失敗する確率が高い。

4. 以上の 2, 3 より、MS の数が少なく、アクセス確率が高い(または低い)場合、全 MS からランダムで選ばれる確率が増えて公平性は RR 方式に近づぐが、トレードオフの観点から通信容量は低下する。

今後さらに MS の数、ミニスロット数、アクセス確率などの数値を現実的な環境に近づけ、通信容量と公平性の間のトレードオフの関係を考えて上手く設定することで、より確かな研究結果が得られ、無駄の少ないスケジューリング方法となり得るのではないかと考えられる。

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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] X. Qin and R. Berry, "Exploiting multiuser diversity for medium access control in wireless networks," *Proc. of IEEE INFOCOM '03*, pp.1084-1094, 2003.
- [8] 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.
- [9] G. L. Stüber, *Principles of mobile communication*, 2nd ed., Kluwer, 2001.
- [10] 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.
- [11] 石井佑美香, 岡橋実加, 安江佐織, "1FFスケジューリングの公平性に関する研究" 南山大学数理工学情報学部卒業論文2012年1月