

OFF スケジューリングにおけるパケットのバースト確率

M2012MM017 松原正悟

指導教員：河野浩之

1 はじめに

現在無線通信網においてマルチユーザダイバーシチを利用した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一定の単位時間ごとにチャネル状態の良いユーザを選択し、チャネル利得の効率化を図るダイバーシチである。しかし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への公平性のトレードオフが非常に重要であり現在その両立が問題となっている [2]。本研究ではユーザ間の公平性は有用性が確認されているがシステム全体のチャネル容量に関する研究が行われていない [5]。Opportunistic Feedback Fair(OFF) スケジューリングのネットワークを想定しそのネットワークにおけるパケットの待ち行列遅延時間に着目し、待ち行列遅延時間のバースト確率を Adaptive Modulation and Coding(AMC) を利用してシミュレーションを行う。シミュレーション結果を精査することで、OFF スケジューリング下でのパケット遅延のバースト確率を調べる。また One-Bit Feedback Fair(1FF) スケジューリング下でのパケット遅延のバースト確率と比較し OFF スケジューリングの性能評価を行う。またバースト確率とは 400 タイムスロット以上の遅延と仮定する。1 節では研究背景について述べる。2 節では先行研究について述べる。3 節では本研究で使用するネットワーク、スケジューリングのモデルについて述べる。4 節ではシミュレーションの結果について述べる。5 章ではまとめと今後の課題について述べる。

2 関連研究

本節では先行研究のスケジューリングについて述べる。

2.1 Round-Robin スケジューリング

Round-Robin(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に Mobile station(MS) の状態は関係なく MS にサービスを提供するスケジューリングである。RR スケジューリングではユーザへの公平性は保たれているがマルチユーザダイバーシチを全く利用しないためシステム全体のチャネル容量が低くなってしまふことに問題がある。

2.2 Knopp and Humblet スケジューリング

Knopp and Humblet(KH) スケジューリングは RR スケジューリングとは全く逆でマルチユーザダイバーシチを最大限に利用したスケジューリングである。最も Signal-to-Noise Ratio(SNR) 値の高い MS にサービスを提供するのでシステム全体のチャネル容量は最大となるが、SNR 値が平均的に低いユーザにはサービスされにくくユーザ間の公平性に問題がある。

2.3 Proportional Fair スケジューリング

Proportional Fair(PF) スケジューリングはユーザ間の公平性とシステム全体のチャネル容量のバランスをとるために考え出されたスケジューリングである。PF スケジューリングでは各 MS の SNR 値をその MS の平均 SNR で割った値を正規化した SNR 値とし、正規化 SNR 値が最も高い MS にサービスのために選択する。正規化 SNR 値は独立同一分布 (independent and identically distributed) に従うので、PF スケジューリングでは各ユーザが選ばれる確率が等しくユーザ間の公平性が保たれている。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まったく利用していない RR スケジューリングと比べると大きくなるのが知られている。しかし、PF スケジューリングは各 MS が毎回正規化した値を Base Station(BS) に報告するので、帯域と電力の消費が大きいことが問題となっている。

2.4 Quantized Proportional Fair スケジューリング

Quantized Proportional Fair(QPF) スケジューリングは PF スケジューリングの正規化 SNR 値の送る方法を直接値を送るのではなく量子化された値を BS 送ることによって帯域の消費と電力の消費を抑えることができる。量子化することによって平均チャネル容量に大きく影響する可能性が考えられるが、適切な量子化を行うことによって十分なチャネル容量のサービスを行うことが出来るのが知られている。また公平性も PF スケジューリング同様保たれているといえる。

2.5 One-bit Feedback Fair スケジューリング

QPF スケジューリングの量子化を 2 段階にしたものを 1FF スケジューリングと呼ぶ [3]。2 段階という少ない量子化でもチャネル容量と公平性は保たれている。2 段階にすることによってかなり帯域の消費を抑えることができる。しかし MS の数が増加するにつれてフィードバック情報を読み込む時間が長くなってしまふ問題がある。

3 モデル

本節では本研究で使用するモデルについて述べる。最初にシステムモデルについて説明しマルコフ連鎖モデルについて述べる。その後パケットサービスモデル、パケット到着モデルについて述べる。

3.1 システムモデル

本研究では K 個の MS と 1 個の BS から構成されるセルラネットワークを想定し、BS は K 個の MS との通信を行う下りリンクにおいて OFF 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 の無線チャンネルの正規化 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ンネルモデル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.

3.2 マルコフ連鎖モデル

本節ではマルコフ連鎖モデルについて述べる. まず, k ($k = 1, \dots, K$) 番目のユーザの n スロット時の SNR 値を $\{Z_n^{(k)}\}_{n=0}^{\infty}$ と定義する. さらにその SNR 値を正規化した値を L 個のチャンネルグレードに分割する. 次に有限状態マルコフ連鎖モデルの状態空間を $\{1, \dots, L\}$ とする. $p_{i,j}$ ($p_{i,j} = 1, \dots, L$) を有限マルコフ連鎖の状態 i から状態 j への遷移確率とする. 例えば $p_{0,1}$ は状態が 0 から 1 へと遷移する確率である. また $p_{1,1}$ は状態が 1 から 1 へと遷移する確率すなわち状態 1 の時状態 1 を維持する確率である. このときタイムスロット T_f はかなり短い時間で設定されるものとして扱うので 2 つ以上先の状態に遷移することがないと言えるので式 (1) を定義することができる.

$$p_{i,j} = 0, \quad |i - j| \geq 2 \quad (1)$$

次に状態が隣接した一つ上の状態に遷移する確率は式 (2) と定義することができる.

$$p_{i,i+1} = \frac{\chi(\gamma_{i+1})T_f}{\pi_i}, \quad i = 0, \dots, L-2 \quad (2)$$

さらに状態が隣接した一つ下の状態に遷移する確率は式 (3) と定義することができる.

$$p_{i,i-1} = \frac{\chi(\gamma_i)T_f}{\pi_i}, \quad i = 1, \dots, L-1 \quad (3)$$

またここでの $\chi(\gamma)$ は Nakagami-m モデルでのタイムスロットごとの SNR 値 γ のレベルクロスレートを表しており式 (4) として定義することができる.

$$\chi(\gamma) = \frac{\sqrt{2\pi}f_d}{\Gamma(m)} \left(\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right)^{m-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \quad (4)$$

ここで f_d はドップラー拡散周波数であり, $\bar{\gamma} = E[\gamma]$ は受信した SNR 値の平均値である. また式 (4) での $\Gamma(m)$ は $\Gamma(m) = \int_0^{\infty} t^{m-1} \exp(-t) dt$ のガンマ関数である. また π_i ($i \in L$) は有限状態マルコフ連鎖モデルにおける状態 i の時の定常確率を表している. 定常確率 π_i ($i \in L$) は式 (5) として定義することができる.

$$\pi_i = \frac{\Gamma(m, m\gamma_i/\bar{\gamma}) - \Gamma(m, m\gamma_{i+1}/\bar{\gamma})}{\Gamma(m)} \quad (5)$$

また $\Gamma(m) = \int_x^{\infty} t^{m-1} \exp(-t) dt$ は不完全ガンマ関数を補足するものである. $p_{i,j}$ は確率であるため $\sum_{j=0}^{L-1} p_{i,j} = 1$ である. 式 (1)-式 (3) と $\sum_{j=0}^{L-1} p_{i,j} = 1$ より状態が遷移しない確率を得ることができる. 状態が遷移しない確率は式 (6) として定義することができる.

$$p_{i,j} = \begin{cases} 1 - p_{i,i+1} - p_{i,i-1} & (i = 1, \dots, L-2) \\ 1 - p_{i,i+1} & (i = 0) \\ 1 - p_{i,i-1} & (i = L-1) \end{cases} \quad (6)$$

さらに OFF スケジューリングにおいては $i = 0, 1$ となるので OFF スケジューリングの場合の状態が遷移しない確率は式 (7) として定義することができる.

$$p_{i,j} = \begin{cases} 1 - p_{0,1} & (i = 0) \\ 1 - p_{1,0} & (i = 1) \end{cases} \quad (7)$$

3.3 Adaptive Modulation and Coding

AMC とは, MS のチャンネル状態によって適切な送信モードに適応させる通信方式である. チャンネル状態の良い MS には多量のパケットを送信し, チャンネル状態の悪い MS には少量のパケットを送信する. パケット送信量を適切に使い分けることによって安定した通信を行うことができる. 本研究ではタイムスロットごとに MS の状態が変化するものとし送信モードは 8 段階のモードがある AMC モデルを利用する. なおモードの遷移確率は有限状態マルコフ連鎖モデルを利用することによってうまく近似できる. Rate はタイムスロットごとに送信できるパケット数を表している. 本研究では参考文献 [1] で示された AMC を利用するものとする.

3.4 到着プロセス

本節ではパケットの到着プロセスについて述べる. 本研究では, パケットの到着は ON-OFF ソースによってパケットが到着すると想定する. ON-OFF ソースは ON 状態, OFF 状態と 2 状態をタイムスロットごとに変化していき, OFF 状態の時は送るパケットが発生しないものとし, ON 状態の時は確率 λ で 1 パケット発生するものとする. ON 状態の時に OFF 状態, OFF 状態の時に ON 状態に遷移する確率は, それぞれ $1 - \alpha$, $1 - \beta$ ($0 \leq \alpha, \beta \leq 1$) と定義する.

ON-OFF ソースは 3 つのパラメータ α , β , λ によって定義される. ON 状態を維持する平均時間 B_{on} , OFF 状態を維持する平均時間 B_{off} , 平均到着レート ρ をパラメータとして考える場合, B_{on} , B_{off} , ρ との関係は式 (8) で定義することができる.

$$B_{on} = \frac{1}{1 - \alpha}, B_{off} = \frac{1}{1 - \beta}, \rho = \frac{\lambda(1 - \beta)}{2 - \alpha - \beta} \quad (8)$$

3.5 Opportunistic feedback fair スケジューリング

本節では本研究でシミュレーションを行い性能を評価する OFF スケジューリングについて述べる. OFF スケジューリングではアップリンクの最初にある 1 つまたは複数のランダムアクセスミニスロットを用いる. すべての MS のチャンネル利得は独立であると仮定し同じ確率変数を用いる. また図 1 は OFF のシステムモデルを示し図中の番号は以下の番号が行われている場所を示している.

1. MS が送信しようとする時 SNR 値を正規化する.
2. MS が定められた正規化 SNR を超えた場合のみ一定の確率でミニスロットに送信される.
3. 二つ以上の MS が同じミニスロットにフィードバック情報を送信した場合衝突が起こり正しく受信され

ない。よって一つの MS のみがミニスロットにフィードバック情報を送信した場合のみ正しく受信される。

4. BS は正しく受信されたミニスロットの中からランダムに一つ選択する。
5. 正しく受信されたミニスロットがなかった場合すべての MS からランダムに一つ選択する。
6. 最後に選択した MS に対して AMC モデルを用い適切な送信レートでサービスを行う。

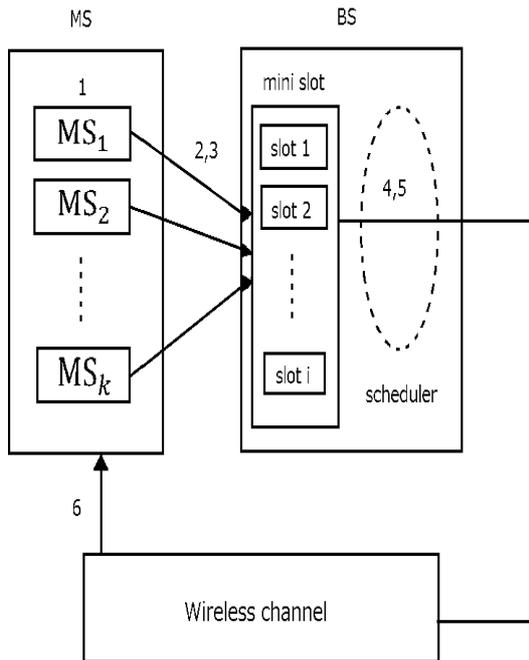


図 1 Opportunistic feedback fair スケジューリング

4 シミュレーション

本節では OFF スケジューリングのバースト確率をシミュレーションによって調査し、1FF スケジューリングと比較した性能評価について述べる。OFF スケジューリングのタイムスロット数 T 、MS の数 K 、ミニスロットの数 m 、アクセス確率 u 、を固定しパケットの到着プロセスの λ を 0.05 から 0.025 刻みで 1.0 まで変化させることによってパケットの到着率におけるバースト確率を調査する。シミュレーションには行計算が優秀な Matlab を使用する。MS がパケットを送信してからサービスされるまでの時間差を記録し、サービスされたパケットがバーストかどうかを判定するプログラムを作成した。最後に統計を取り確率を求めている。以下に本節で示すシミュレーションを行った環境を述べる。各 MS の無線状態の遷移を表す有限マルコフ連鎖モデルの状態数は 2 状態を仮定する。2 状態の閾値は正規化 SNR 値 $\gamma/\bar{\gamma}=2.0dB$ と設定する。MS の平均 SNR 値は $16.0dB$ とする。タイム

スロットは $T=500000$ タイムスロット (1 タイムスロット = 0.001sec) シミュレーションを行うものとする。MS の数は $K=25$ とする。ミニスロットの数は $m=5$ とし、ミニスロットのアクセス確率は $u=0.5$ とする。到着プロセスの α, β の値はそれぞれ $\alpha=0.9, \beta=0.992$ とする。この環境時の有限状態マルコフ連鎖の状態遷移確率を表 1 に示し、パラメータをまとめた表を表 2 に示す。

表 1 状態遷移確率

p_{00}	p_{01}	p_{10}	p_{11}
0.991864	0.008136	0.031557	0.968443

表 2 設定したパラメータ

パラメータ	値	パラメータ	値
MS の数	25	タイムスロット数	500000
平均 SNR 値	16.0dB	正規化 SNR 閾値	2.0dB
ミニスロット数	5	アクセス確率	0.5
ON 状態維持確率	0.9	OFF 状態維持確率	0.992

以上の環境で OFF スケジューリングと 1FF スケジューリングのパケット到着率によるパケットのバースト確率をシミュレーションを 100 回行い求めたものを図 2 に示す。本稿ではバーストは 400 タイムスロット以上の遅延と仮定する。

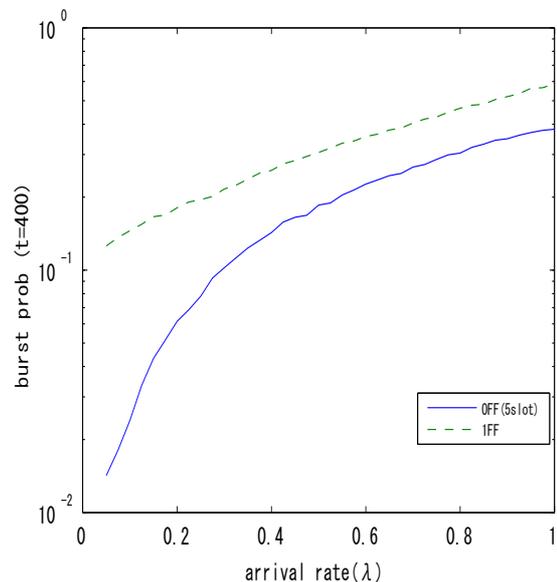


図 2 パケットの到着率におけるバースト確率

図 2 は横軸にパケットの到着率、縦軸にバーストが起こる確率を示している。よってグラフの下に行くほどバーストの確率が低くなりチャンネル容量の高いスケジューリングといえる。シミュレーションの結果である図 2 から λ の値が低い時は OFF スケジューリングの方が非常にバーストの起こる確率が低いことがわかる。しかしながらパケット到着レートが上がるにつれて 1FF スケジューリ

ングはわずかながらバースト確率が高くなっているのに対し OFF スケジューリングはバースト確率が 1FF スケジューリングに比べてパケット到着レートが上がるにつれて増加する確率が大きいことがわかる。これは状態が良い場合は 1FF スケジューリングは一定の確率でパケットがサービスされるのに対し OFF スケジューリングは状態が良い場合でもミニスロットにアクセスできなかったりミニスロットにアクセスできたとしても衝突が起ってしまう場合があるためである。

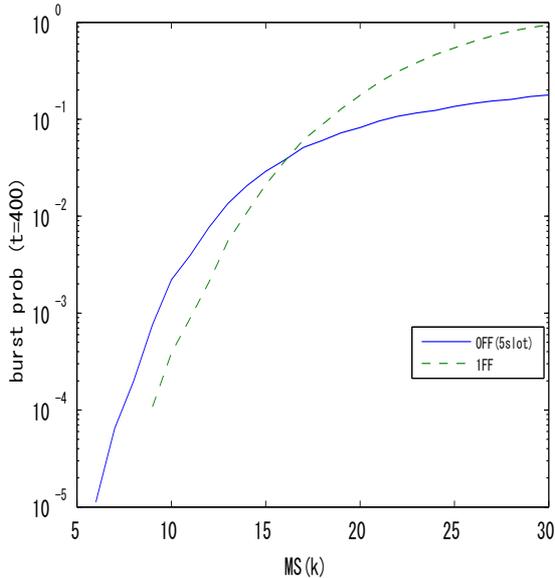


図 3 MS 数におけるバースト確率 ($\lambda=0.2$)

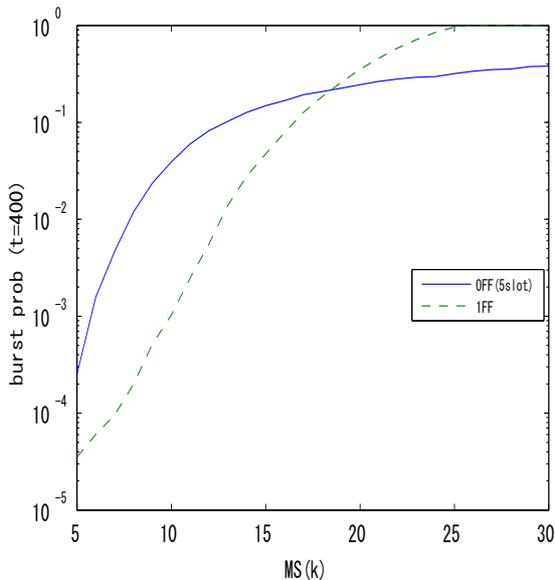


図 4 MS 数におけるバースト確率 ($\lambda=0.6$)

図 3,4 は横軸にパケットの到着率, 縦軸にバーストが起こる確率を示している。それぞれ MS の数を変化させた結果であるが図 3 は $\lambda=0.2$, 図 4 は $\lambda=0.6$ とパラメータ

を変えてシミュレーションを行った結果である。それぞれ $K=17$ までは 1FF スケジューリングの方が高性能を示しそれ以降は OFF スケジューリングの方が高性能を示している。この結果からバースト確率には OFF スケジューリングと 1FF スケジューリングを比較した場合パケットの到着率より MS の数が深く関係していることが分かった。

5 おわりに

本研究では無線通信網において QoS に非常に関係のあるパケットのバースト確率を 1FF スケジューリング, OFF スケジューリングでそれぞれ調査を行い, 1FF スケジューリングと OFF スケジューリングを比較することによってパケットの遅延性能の評価を行った。今回のシミュレーションではパケットの到着レートと MS 数を変化させていきバーストが起こる確率を調査した。今回調査した結果ではパケットの到着率により MS の数の影響が強く, OFF スケジューリングは MS の数が 17 を超える場合 1FF スケジューリングより高性能だと分かった。セルラーネットワークなどでスケジューリングを使用する場合 MS の数は膨大になるので OFF スケジューリングの有用性を示すことができた。この結果からバースト確率には MS の数が深く関係していることが分かり, 接続している MS 数が少ないスカイプ会議などでは 1FF が有効であるが, MS 数が多いセルラネットワークなどでは OFF を使用したほうが有効であり, OFF スケジューリングの有用性を示すことができた。

参考文献

- [1] 椴山馨:1FF スケジューリングにおけるパケットの待ち行列遅延の解析に関する研究, 南山大学大学院数理情報研究科数理情報専攻修士論文 (2011).
- [2] L. Yang, M. Kang and M.-S. Alouini, " On the capacity-fairness tradeoff in multiuser diversity systems," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.56, no4, pp. 1901-1907, 2007.
- [3] F. Florén, O. Edfors and B.-A. Molin, " The effect of feedback quantization on the throughput of a multiuser diversity scheme," IEEE GLOBECOM on Global Telecommunications Conference, vol.1, pp. 497-501, 2003.
- [4] T. Tang and R. W. Heath Jr, " Opportunistic feedback for downlink multiuser diversity," IEEE Communications Letters, vol.9, no10, pp. 948-950, 2005.
- [5] H. Li, Q. Guo, L. Fang and D. Huang, " Fairness and capacity analysis of opportunistic feedback protocol with proportional fair or maximum throughput scheduling, " International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, pp. 1-5, 2012.