

無線通信ネットワークにおける 結合スケジューリングによる遅延評価

M2012MM048 山本裕哉

指導教員：河野浩之

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を利用することでチャン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、無線ネットワークにおいて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 [1].

マルチユーザダイバーシチは、チャンネル変動が独立な複数のユーザが存在する中で、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チである。しかし、帯域の効率的利用だけでは、各ユーザの要求する要求するサービス品質 (Quality of Service, QoS) を満足させるとは言えない。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は、システム全体のチャンネル容量と各ユーザへの公平性の間にトレードオフがあり、その両立が非常に重要となってくる [2].

本研究では無線通信ネットワークにおけるマルチユーザダイバーシチを利用したパケットスケジューリングに焦点をあてる。特に Adaptive Modulation and Coding(AMC) が実装されている結合スケジューリングが行われているセルラ無線通信ネットワークを想定し、パケットの待ち行列遅延に関するシミュレーションを行う。本研究では、Round Robin スケジューリングと One-bit Feedback Fair スケジューリングを組み合わせたものを結合スケジューリングと呼ぶ [4]. シミュレーション結果を元に結合スケジューリング下のパケットの遅延確率を求めテイル分布の性質を調査する。

本稿の第 2 節では先行研究として行われているスケジューリングについてのスケジューリング方式、利点、欠点について記述する。第 3 節では本研究で使用するシステムモデルについて述べる。結合スケジューリング、AMC モデル、到着プロセス、マルコフ連鎖モデルについて記述する。第 4 節ではシミュレーションについて述べる。パケット遅延確率を求めるシミュレーションモデルを記述し性能評価を行う。第 5 節ではまとめについて述べる。

2 先行研究

2.1 Round-Robin(RR) スケジューリング

RR スケジューリングは、マルチユーザダイバーシチをまったく利用せず Mobile Station(MS) の Signal-to-Noise Ratio(SNR) 値に関係なく各 MS を順番にサービスを行うスケジューリング方式である。RR スケジューリングでは、各 MS を順番にサービスするため公平性は優れているが、マルチユーザダイバーシチをまったく利用せず、各ユーザの無線チャンネル状態の良し悪しも考慮せずサービスを提供するため、システム全体のチャンネル容量

が低くなってしまいうことに問題がある。

2.2 Knopp and Humblet(KH) スケジューリング

KH スケジューリングは、現時点で最も SNR 値が高い MS にサービスを行うスケジューリング方式である。KH スケジューリングは RR スケジューリングとは正反対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方式となる。KH スケジューリングでは、常に MS の中で最高のチャンネル容量を持つ MS にサービスを行うので、システム全体のチャンネル容量は大きくなる。しかしながら、無線リンク状態の悪いユーザが選ばれる確率が非常に低くなってしまいうためユーザ間の公平性に深刻な問題がある。

2.3 Proportional Fair(PF) スケジューリング

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 (independent and identically distributed) に従うので、各ユーザに公平にサービスを提供することが可能になり、かつ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 スケジューリングと比べると大きくなることが知られている。しかし PF スケジューリングでは各 MS が Base Station(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。

2.4 Quantized Proportional Fair(QPF) スケジューリング

QPF スケジューリングは、PF スケジューリングの問題を解決するために考えられたスケジューリングである。正規化した SNR 値を BS に報告するのではなく、量子化された正規化 SNR 値を表すビットを BS に報告すればよいので帯域の消費を抑えることが出来る。正規化した SNR 値を量子化することによって平均チャン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。

2.5 One-bit Feedback Fair(1FF) スケジューリング

1FF スケジューリングは、QPF スケジューリングの量子化を 2 状態にしたスケジューリング方式である [5]. 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。1FF スケジューリングは長期間で見ると非常

に優れているが短時間で見た場合同じ MS ばかり選んでしまい公平性に欠ける恐れがある。

3 モデル

3.1 結合スケジューリング

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を結合スケジューリングと呼ぶ。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、または RR スケジューリングであるのかを特定する必要がある。また RR スケジューリングの場合、何番目の MS へのサービスを行うのか決定する必要がある。このときフレーム中の n 番目のスロットでどのようなスケジューリング方式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る。
- $m_n > 0$ のときは RR スケジューリングが行われる。また $m_n > 0$ のときは、 m_n 番目の MS へのサービスが行われるものとする。

3.2 システムモデル

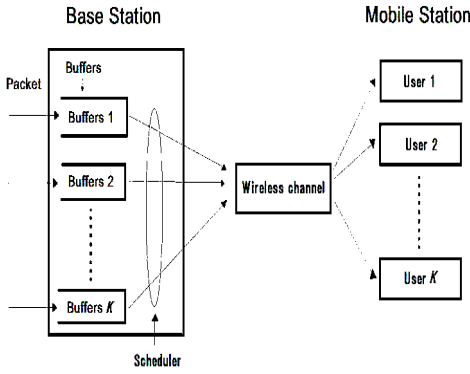


図 1 セルラ無線通信ネットワーク

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 個の 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。 K 個の MS から選ばれた MS がスケジューリングを受けサービス先の MS へと通信を行う。また 1 タイムスロットあたりを T_f とし、時間はタイムスロット間隔に分割されており、すべての動作はタイムスロットと同期して行われるものとする。

3.3 有限状態マルコフ連鎖モデル

本研究では各 MS の正規化された SNR 値の確率過程は Nakagami-m モデルの一つで $m = 1$ の場合の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。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 $\{0, \dots, L-1\}$ とし、 $p_{i,j}(0, \dots, L-1)$ 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。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。これにより式 (1) を定義することができる。

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

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確率は、式 (2) と定義される。

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

状態が隣接した 1 つ下の状態に遷移する確率は、式 (3) と定義される。

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

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) があたえられる。

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

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 $\pi_i (i \in L)$ 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。 $\pi_i (i \in L)$ は以下の式 (5) で得られる。

$$\pi_i = \exp(-\gamma_i/\bar{\gamma}) - \exp(-\gamma_{i+1}/\bar{\gamma}) \quad (5)$$

$p_{i,j}$ 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式 (6) に示している [1]。

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

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 値が閾値より下の範囲に留まる確率は、

$$p_{0,0} = 1 - p_{0,1} \quad (7)$$

となり、正規化 SNR 値が閾値より上の範囲に留まる確率は、

$$p_{1,1} = 1 - p_{1,0} \quad (8)$$

となる。(7), (8) 式の値は共に 0 以上 1 以下の値である。

3.4 Adaptive Modulation and Coding

AMCとは、無線状態に応じて変調方式や符号化式、及びその他の信号等を調整する仕組みのことである。AMCの信号やパラメータは無線状態が変わるにつれて変化する。無線状態の良い環境では高いデータレートでサービス提供し、無線状態の悪い環境では確実にデータが届くように低い変調方式を使用する。本研究では文献 [3] で利用されている AMC が使われているものと仮定する。タイムスロットごとに状態が変化するものとし 8 段階のモードがある AMC モデルを利用する。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。

3.5 到着プロセス

本研究では、パケットの到着は ON-OFF ソースによって生成されると仮定する。ON-OFF ソースは、ON 状態、OFF 状態の 2 つの異なる状態を持っている。OFF 状態では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 状態に遷移する確率を $1 - \alpha$ と定義し、OFF 状態の時に ON 状態に遷移する確率を $1 - \beta$ と定義する。ただしこの時 α, β の値の範囲は、それぞれ $0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1$ である。このように本研究で考える ON-OFF ソースモデルは、 α, β, λ の 3 つのパラメータで記述される。

ON-OFF ソースの 3 つのパラメータ α, β, λ により B_{on}, B_{off}, ρ を表すことができる。 B_{on} は ON 状態を維持する平均時間、 B_{off} は OFF 状態を維持する平均時間、 ρ は平均到着レートをパラメータとして考える場合、元の 3 つのパラメータとの関係は式 (9) で与えられる。

$$B_{on} = \frac{1}{1 - \alpha}, B_{off} = \frac{1}{1 - \beta}, \rho = \frac{\lambda(1 - \beta)}{2 - \alpha - \beta} \quad (9)$$

4 シミュレーション

4.1 実験環境

シミュレーションを行うプログラムの作成には、Matlab を使用する。プログラムの流れとして、

1. パケットが到着したか否かを審査する。また、パケットが到着した場合その時間を記録する。
2. パケットがキューにある場合そのパケットがサービスを受けるか審査する。
3. サービスを受けたときそのパケットの遅延時間を記録する。
4. シミュレーションが終わったとき記録した全ての遅延時間の平均を求め、テイル分布を求める。

図 2 にプログラムの流れを示す。

4.2 シミュレーション結果

シミュレーションは、 β の値を変化させパラメータを 3 つの状態ですべて行った。また、 T_f (タイムスロット)=0.001(sec), f_d (ドップラー拡散周波数)=10(Hz), $\hat{\gamma}$ (量子化の閾値)=2.0(dB), MS の数は 10 個は全てのパラメータに対して共通のものとする。また表 1 に β の値を変化させた状態 1~3 のパラメータを示す。 α は到着プ

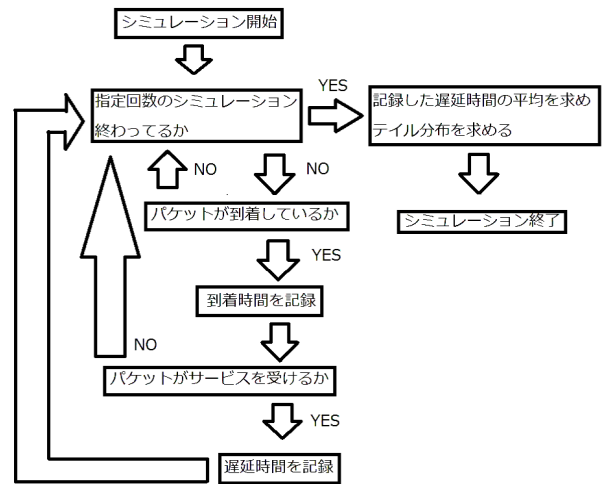


図 2 テイル分布を求めるプログラムの流れ

ロスにおいて ON 状態を維持する確率、 β は到着プロセスにおいて OFF 状態を維持する確率、 λ は ON 状態の時に 1 パケット発生する確率、 $\bar{\gamma}$ は平均 SNR 値をそれぞれ表している。また AMC モデルは文献 [3] の値を使用する。

表 1 β の変化による状態の設定

状態	パラメータ
1	$\bar{\gamma}=16$ (dB), $\lambda=0.20, \alpha=0.900, \beta=0.500$
2	$\bar{\gamma}=16$ (dB), $\lambda=0.20, \alpha=0.900, \beta=0.800$
3	$\bar{\gamma}=16$ (dB), $\lambda=0.20, \alpha=0.900, \beta=0.992$

表 1 のようなネットワーク環境でシミュレーションを 100 回行い遅延時間の平均の結果を図 3 に示す。

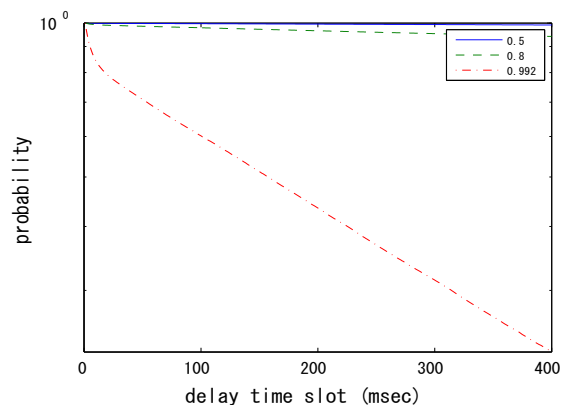


図 3 β の値の変化の結果

図 3 の結果より、 β の値が 0.8 から 0.992 にかけて急激に遅延の起こる確率が小さくなっており、比較したとき 0.992 の方が 75% 遅延の起こる確率が低くなることから β は遅延の起こる確率に大きく影響していることがわかった。

た. 次にどのような時に β の値が適切かの調査を行った. 今回行ったのは, データ通信の場合とリアルタイム通信の場合の調査を行った. 図 4 に, データ通信の場合のシミュレーションによって推定された結果を, 図 5 に, リアルタイム通信の場合のシミュレーションによって推定された結果を示す. 図 4 と図 5 の横軸は β の値の大きさ, 縦軸は遅延確率を表す.

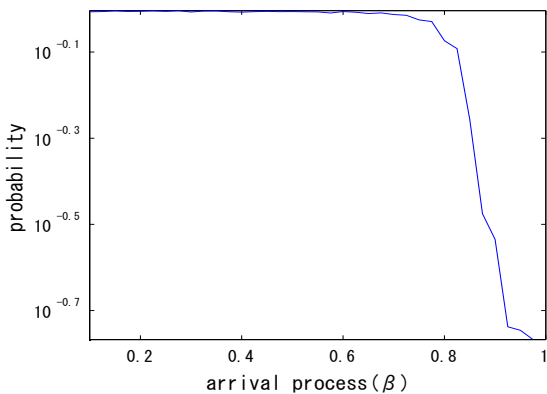


図 4 データ通信の場合のシミュレーション

データ通信の場合, 遅延時間を 1000msec 以内にするのが一般的であるので図 4 の結果は, 1000msec 以上の遅延が起こる確率を調査したものである. 図 4 より, β の値が 0.825 あたりから急激に遅延の起こる確率が低くなっていき 0.925 以降はあまり遅延の起こる確率に変化がないとわかった. よってデータ通信の場合 β の値が 0.925 以上のとき, QoS が保障されるとシミュレーションによりわかった. しかし今回は, α を 0.900, λ を 0.2 に固定した場合だが, α を 0.9 以下に下げた場合 β の値は 0.925 よりも下回ることが考えられる.

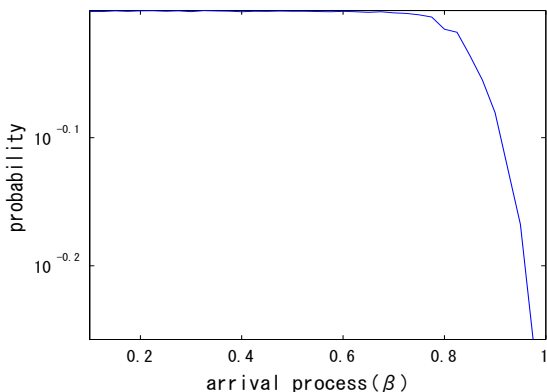


図 5 リアルタイムの場合のシミュレーション

リアルタイム通信の場合, 遅延時間を 150msec 以内にするのが一般的であるので図 5 の結果は, 150msec 以上の遅延が起こる確率を調査したものである. 図 5 より, データ通信の場合と同様に β の値が 0.825 あたりから急激に遅延の起こる確率が低くなっていきそれ以降も急激に遅延確率は下がっていくので, リアルタイム通信の場合は β

の値を 0.975 以上に設定することが望ましいとシミュレーションの結果よりわかった. セルラ無線通信ネットワークに結合スケジューリングを導入する場合, α が 0.900 の時, データ通信は β の値を 0.925 以上のとき, チャンネル容量を高く, ユーザ間の公平性も高くすることができ, リアルタイム通信の場合は β の値を 0.975 以上のとき, 音声通信などの品質を保つことができると考えられる.

5 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スケジューリングに着目し, 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結合スケジューリングを用いたセルラ無線通信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のテイル分布をシミュレーションで調査を行った. 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. 本研究では, 結合スケジューリングのテイル分布を性質を調査するため β の値を変更しシミュレーションを行った. これにより結合スケジューリングによるパケットの待ち行列遅延時間を計算するモデルからシミュレーション結果を得ることが出来た. シミュレーション結果より, β の値が結合スケジューリングの性能に大きく影響することがわかった. セルラ無線通信ネットワークに結合スケジューリングを導入する場合, α が 0.900 の時, データ通信は β の値が 0.925 以上のとき, チャンネル容量を高く, ユーザ間の公平性も高くすることができ, リアルタイム通信の場合は β の値が 0.975 以上のとき音声通信などの品質を保つことができると考えられる.

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] F. Ishizaki and G. U. Hwang, "Cross-layer design and analysis of wireless networks using the effective bandwidth function," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.6, No.6, pp. 3214–3219, 2007.
- [4] F. Ishizaki, "Studies on the Short Term Fairness Properties of Joint Scheduler," *International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking* Vol.4, Issue 3, pp. 23–39, 2012.
- [5] O. Somekh, A. M. Haimovich and Y. Bar-Ness, "Sum-rate analysis of downlink channels with 1-bit feedback," *IEEE Commun. Letters*, Vol.11, No.2, pp.137–139, 2007.