

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

M2010MM028 榎山 馨

指導教員：石崎 文雄

1 研究背景

現在、第4世代移动通信システムといわれる次世代移动通信ネットワークの開発が進んでおり、無線データサービスに対する需要は増加を続けている。無線データサービスのトラヒックは、マルチメディア会議のようなリアルタイムのトラヒックとファイル転送のような非リアルタイムのトラヒックが混ざり合っている。このような無線通信ネットワークにおいては、QoS(Quality of Service)保証が不可欠であり、遅延やパケット損失がリアルタイムトラヒックに大きく影響する。無線通信ネットワークは有線通信ネットワークに比べ、非常に信頼性が低く、環境によって通信信号が大きく変化するため厳密なQoS保証の妨害になる。つまり、無線通信ネットワークのQoS保証においては、効率的な有効帯域の利用のためにスケジューリングや通信制御が重要な鍵になる。

無線通信ネットワーク上で有効帯域を得るための方法として、ダイバーシチを利用する事が挙げられる。ダイバーシチによって、送信機と受信機の間が存在する複数の独立の信号経路から高いチャネル容量を持つ経路を選択する事ができる。中でも、マルチユーザダイバーシチを導入したものとしてはKH(Knopp and Humblet)スケジューリング[1]がある。マルチユーザダイバーシチとは、チャネル変動が独立な複数のユーザが存在するシステムにおいて、良好なチャネル利得を持つユーザが選択させる事をいう。

近年、いくつかの研究で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アルゴリズムや通信制御の研究が行なわれている。そして、それらの研究によってマルチユーザダイバーシチを利用する事でシステム全体の最大スループットとチャネル容量を大幅に増加させる事が明らかにされた。それらの研究に反して、参考文献[2]のWuとNegi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アルゴリズム下で発生する遅延を無線通信ネットワークのQoS保証の問題としている。彼ら、レイリーフェージングを想定した K 人のユーザが存在するダウンリンクチャネルのQoS保証に関して議論している。最近では、参考文献[2]のようにパケットの待ち行列遅延に着目した無線ネットワークのQoS保証に関する研究も増えており、参考文献[3]もその一つである。参考文献[3]は参考文献[2]と同様に無線ネットワークの遅延に関する研究を行っており、さらにパケットの待ち行列遅延を解析するために、実効帯域理論を用いた手法を提案している。彼らは、マルチユーザダイバーシチを利用しているCKH(Constant version of the Knopp and Humblet)スケジューリングと利用していないRR(Round Robin)スケジューリングの比較している。その結果、ネットワー

クの負荷が小さい時にCKHスケジューリングはRRスケジューリングよりサービスレートの高くなり、反対にネットワークの負荷が大きくなるとRRスケジューリングはCKHスケジューリングよりサービスレートが高くなる事が明らかにされた。

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ついて焦点をあてる。特に、AMC(Adaptive Modulation and Coding)を利用した1FF(One-bit Feedback Fair)スケジューリングについて考える。1FFスケジューリングとは、QPF(Quantized Proportional Fair)スケジューリングに基づいてアルゴリズムが構築されており、本研究では量子化を2状態にしたQPFスケジューリングを1FFスケジューリングと呼ぶ。このようなパケットおきにスケジューリングを行なうキューイングモデルは流体キューイングモデルよりスケジューリングアルゴリズムの性能評価に適していると考えられる。その理由として、流体キューイングモデル上では複数のユーザが同時に送信するが、実際のネットワーク上ではユーザはパケットごとにスケジューリングされているからである。また、本研究では離散時間でのキューイングモデルに関して議論する。各ユーザの無線チャネルプロセスはレイリーフェージングチャネルを用い、その上で1FFスケジューリング下でのサービスプロセスの実効帯域関数を決定する。決定した実効帯域関数から、実効帯域理論に基づいた離散時間キューイングモデルを解析する。その解析結果から、1FFスケジューリング下の任意のユーザのパケットの待ち行列遅延のテイル分布の推定する。また、本研究では1番目のユーザを任意のユーザとし、そのユーザをタグユーザと呼ぶ。

2 システムモデル

本モデルは、無線チャネル上にマルチトラヒックが存在するシステムモデルである。また、時間はタイムスロット T_f で分割され、1スロット毎にパケットがサービスされる事を仮定する。このモデルでは、基地局から K 個($K \geq 1$)のモバイル端末(ユーザ)にデータを送信するセルラー無線ネットワークのダウンリンクについて考える。

2.1 チャネルモデル

各ユーザの無線チャネルプロセスはNakagami-mチャネルモデルの $m=1$ の場合のレイリーフェージングチャネルになる事を仮定する。

まず、 k 番目($k=1, \dots, K$)のユーザの無線チャネルプロセスを $\{Z_n^{(k)}\}_{n=0}^{\infty}$ と定義する。 $Z_n^{(k)}$ とは k 番目のユーザの n スロット時のSNR(Signal-to-Noise Ratio)値を示している。すべての無線チャネルプロセスは各ユーザ毎に独立であり、定常であると仮定し、加えて無線チャネ

ルプロセスは一様である事も仮定する。

次に、マルチユーザダイバーシチを利用するため無線チャンネルプロセスの正規化された SNR 値を L 個のグレードで量子化すると仮定し、そのときの各グレードの正規化された SNR 値 $\{\hat{\gamma}_l\}_{l=0}^L$ ($\hat{\gamma}_l = \gamma_l/\bar{\gamma}$, $\hat{\gamma}_0 = 0$, $\hat{\gamma}_l < \hat{\gamma}_{l+1}$, $l = 0, \dots, L-1$, $\hat{\gamma}_L = \infty$) とする。また、 $\bar{\gamma} = E[\gamma]$ は受信した SNR 値の平均値である。ここで $\mathcal{L} = \{0, \dots, L-1\}$ についての確率変数 $L_n^{(k)}$ を定義する。確率変数 $L_n^{(k)}$ は $\hat{\gamma}_l < Z_n^{(k)}/\bar{\gamma} < \hat{\gamma}_{l+1}$ ならば $L_n^{(k)} = l$ となる。またグレード数が L の時、 $L_n^{(k)}$ は n スロット時の k 番目のユーザのチャンネルグレードと考える。

チャンネルグレードプロセス $\{L_{n=0}^\infty\}$ ($k = 1, \dots, K$) は FSMC (Finite-State Markov Chain) となる [4]。低速フェージングかつ T_f が小さい値であるという条件下では、チャンネルグレードプロセスは隣接する状態にのみ遷移する。また、 $P = (p_{i,j})(i, j \in \mathcal{L})$ を FSMC の遷移行列と仮定し、遷移確率を求めていく。以上の仮定をもとに、以下の式を得る事ができる。

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

次に、隣接する状態への遷移確率は以下ようになる。

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

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

$\chi(\gamma)$ はレイリーフェージングチャンネルでの SNR 値 γ のレベルクロスレートであり、以下の式が与えられる。

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

f_d はドップラー拡散周波数である。また、 π_i ($i \in \mathcal{L}$) は FSMC おいて状態 i での定常確率である。定常確率 π_i ($i \in \mathcal{L}$) は以下の式で得られる。

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

さらに、 $\sum_{j=0}^{L-1} p_{i,j} = 1$ と式 (1)-(3) より、以下の式を得られる。

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

以上、式 (1)-(3), (6) より遷移行列 P を得る事ができ、また定常分布は式 (5) によって得られる。

2.2 1FF スケジューリング

1FF スケジューリングとは、各ユーザの SNR 値を正規化したものを 2 状態に量子化し、量子化された正規化 SNR 値が最も高いユーザを選択しサービスをするスケジューリングである。また、量子化された正規化 SNR 値をチャンネルグレード $L_n^{(k)}$ と呼ぶ。本モデルでは各ユーザのチャンネルプロセスが独立であると仮定している事から、マ

ルチユーザダイバーシチを利用する事ができる。1FF スケジューリング下では、全てのユーザのチャンネルグレード $L_n^{(k)}$ を知る事ができると仮定する。各ユーザの中で最も高いチャンネルグレードを τ_n^* とし、 τ_n^* を以下のように定義する。

$$\tau_n^* = \max_{k \in \{1, \dots, K\}} L_n^{(k)} \quad (7)$$

もし最も高いチャンネルグレードを持つユーザが複数存在するならば、ランダムで 1 個のユーザが選択され、 n スロット時にパケットを送信する事ができる。また、本モデルではパケットの送信可能の有無、送信レートは AMC によって決定される。AMC については次節で説明を行なう。

2.3 Adaptive Modulation and Coding

AMC は無線リンクの状態に応じて変調方式や符号化方式、及びその他の信号やプロトコルパラメータを調整する仕組みの事である。AMC のプロセスは動的なものであり、信号やプロトコルパラメータは、無線リンクの状態が変わるにつれて変化する。本研究では、参考文献 [5] で示された AMC が使われているものと仮定する。AMC は 1 ms 毎に状態が変化するものとし 8 段階のモードを持つとする。8 つのモードの SNR 値の閾値は表 1 の通りである。例えば、モード 1 は SNR 値が [8.01273, 11.82217) dB であるときに使われ、その時のサービスレートは 1 に等しい。Rate は 1 スロット当り送信できるパケット数を表している。

表 1 AMC モード 8 区分 (閾値)

モード	Rate	x(SNR:dB)
0	0	0.0 ≤ x < 8.01273
1	1	8.01273 ≤ x < 11.82217
2	2	11.82217 ≤ x < 16.24006
3	3	16.24006 ≤ x < 18.84206
4	4	18.84206 ≤ x < 22.58435
5	5	22.58435 ≤ x < 24.97838
6	6	24.97838 ≤ x < 28.57040
7	7	28.57040 ≤ x

3 実効帯域理論による解析

本節では、実効帯域理論 [6] に基づいた解析手法を示す。実効帯域理論は、すでに無線パケットネットワークの研究の分野で広く利用され、接続許可制御やリソース分配の基礎として利用されている。ここで解析の行なうためにいくつかの仮定をする。まず、マルチユーザダイバーシチのチャンネルグレードの量子化の分割数を $L = 2$ とする。次に、パケット誤り率は受信した SNR 値と符号化スキームによって決定される。受信した SNR 値が量子化の閾値 $\hat{\gamma}_1$ を超えた場合、パケット誤り率は無視してもよいとし、また常にパケットの送信が可能になる。さらに、本研究では参考文献 [6] を基に、1FF スケジューリングと AMC を組み込んだ新たな実効サービス帯域関数の定式

化を提案する。また、AMCの利用を考えているため、1スロットあたりに送信できるパケット数はAMCに依存する。以上の仮定を基に、1FFスケジューリングについて解析を行なう。

3.1 実効到着帯域関数

本節では、始めにGE(Gärtner-Ellis) limitの概念から説明していく。一般到着プロセスの累積到着プロセス \tilde{A}_n のGE limit $\Lambda_A(\theta)$ を定義する。 \tilde{A}_n とは時間区間 $[0, n)$ の累積到着プロセスである。 $\Lambda_A(\theta)$ は $\lim_{n \rightarrow \infty} n^{-1} \log E \exp(\theta \tilde{A}_n)$ と記述する事ができる。次に、実効到着帯域関数 $\xi_A(\theta) = \Lambda_A(\theta)/\theta$ を定義する。 $\xi_A(\theta)$ は単調増加である事が知られており、また $\theta \downarrow 0$ である時に平均到着レートに収束し、 $\theta \uparrow \infty$ である時に最大到着レートになる。

次に、本研究でのモデルについて記述していく。ON-OFFソースから到着プロセス $\{A_n\}_{n=0}^{\infty}$ が発生すると仮定し、これは到着プロセスのバースト作用も組み込まれている。ON-OFFソースは、ON状態とOFF状態の異なる二つの状態を持っている。OFF状態ではパケットは発生しないが、ON状態では確率 λ でパケットが1個発生する。ON状態からOFF状態に遷移する確率を $1 - \alpha$ と定義し、反対にOFF状態からON状態に遷移する確率を $1 - \beta$ と定義する。このとき α と β は、 $0 \leq \alpha \leq 1$, $0 \leq \beta \leq 1$ である。以下のON状態の平均期間 B_{ON} 、OFF状態の平均期間 B_{OFF} 、平均到着レート ρ の3つのパラメータはON-OFFソースの決めるために使われる。これらのパラメータは α , β , λ によって表す事ができる。

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

そして、本研究での到着プロセスのGE limit $\Lambda_A(\theta)$ と実効到着帯域関数 $\xi_A(\theta)$ は次のように与えられる。

$$\Lambda_A(\theta) = \log \delta_A(\theta), \quad \xi_A(\theta) = \frac{\log \delta_A(\theta)}{\theta}, \quad \theta \geq 0 \quad (9)$$

$\delta_A(\theta)$ は $\delta_A(\theta) = \zeta(\theta) + \sqrt{\zeta(\theta)^2 - b\phi(\theta)}$, $\phi(\theta) = 1 - \lambda + \lambda e^\theta$, $\zeta(\theta) = (\alpha\phi + \beta)/2$, $b = \alpha + \beta - 1$ によって得る事ができる。

3.2 1FFスケジューリング下での実効サービス帯域関数

本節では、まず一般サービスプロセスのための実効サービス帯域関数について定義する。始めに、一般サービスプロセスのGE limitについて考える。確率変数 $\tilde{C}_n (n = 0, 1, \dots)$ を時間区間 $[0, n)$ の累積サービスプロセスと仮定し、その時の $\Lambda_C(\theta)$ を累積サービスプロセス \tilde{C}_n のGE limitであると考え、累積サービスプロセス \tilde{C}_n のGE limitは $\Lambda_C(\theta) = \lim_{n \rightarrow \infty} n^{-1} \log E \exp(\theta \tilde{C}_n)$ のように記述する事ができる。以上の事から関数 $\xi_C(\theta)$ は以下のようになる。

$$\xi_C(\theta) = -\frac{\Lambda_C(-\theta)}{\theta} \quad (10)$$

式(10)は実効サービス帯域関数と呼ばれている。また、式(10)は $\xi_C(\theta) = -\Lambda_{-C}(\theta)/\theta$ と書き換えられる。実効サービス帯域関数 $\xi_C(\theta)$ は、 $\theta \downarrow 0$ である時に平均サービ

スレートに収束し、また $\theta \uparrow \infty$ である時に最小サービスレートになる事が知られている。

ここから、1FFスケジューリングとAMCを組み込んだ実効サービス帯域関数の新たな定式化について説明する。マルコフ連鎖 $\{(L_n^{(1)}, S_n)\}$ のマルコフ変調過程を $\{C_n\}$ とし、またこの時の S_n は $S_n = \sum_{k=2}^K L_n^{(k)}$ である。本モデルのサービスプロセスのGE limitと実効サービス帯域関数を表すために、いくつかの行列を定義する必要がある。まず、始めに $K \times K$ の行列 R を定義する。

$$[R]_{i,j} = \sum_{k=\max(0, i+j-K+1)}^{\min(i,j)} \binom{i}{k} p_{1,1}^k p_{1,0}^{i-k} \binom{K-1-i}{j-k} p_{0,1}^{j-k} p_{0,0}^{K-1-i-j+k} \quad (11)$$

$[R]_{i,j} (i, j = 0, \dots, K-1)$ は (i, j) 番目の行列 R の要素である。 $[R]_{i,j}$ は $L_n^{(k)} = 1$ であるプロセスが i 個から j 個に変わる確率である。次に、 $2K \times 2K$ の行列 Q_{1FF} を定義する。 Q_{1FF} は $Q_{1FF} = P \otimes R$ であり、 \otimes はクロネッカー積を表している。さらに、 $GK \times GK$ の対角行列 $D_{1FF}(\theta)$ を定義する。 G とはAMCとチャネルグレードを組み合わせたモード数となる。そして、モード数 G はチャネルグレードの閾値 $\hat{\gamma}_1$ によって変化する。AMCがモード $g (g = 0, \dots, G-1)$ のときの、AMCと組み合わせた時のチャネルグレードを以下のように表す事ができる。

$$g^* = \{g | \psi_g \leq \hat{\gamma}_1 \bar{\gamma} < \psi_{g+1}\} \quad (12)$$

ψ_g はAMCのモード g の閾値を表している。この時、AMCの各モードの送信レートを a_g とすると、チャネルグレードと組合せたときの各モードの送信レート \hat{a}_g を以下のように表す事ができる。 $\psi_g = \hat{\gamma}_1 \bar{\gamma}$ となる g が存在しない場合は以下のようなになる。

$$\hat{a}_g = \begin{cases} a_g & \text{if } \hat{g} \leq g^* & (\hat{g} = 0, \dots, G) \\ a_{g-1} & \text{if } \hat{g} \geq g^* + 1 & (\hat{g} = 0, \dots, G) \end{cases} \quad (13)$$

この時の対角行列 $D_{1FF}(\theta)$ を \hat{a}_g を用いて以下のように定義する。

$$D_{1FF}(\theta) = \text{diag} \left(\overbrace{1, \dots, 1}^{g^* \times K}, e^{\hat{a}_{g^*+1}\theta}, \dots, \frac{e^{\hat{a}_{g^*+1}\theta} + K - 1}{K}, \dots, e^{\hat{a}_G\theta}, \dots, \frac{e^{\hat{a}_G\theta} + K - 1}{K} \right) \quad (14)$$

次に、 $\psi_g = \hat{\gamma}_1 \bar{\gamma}$ となる g が存在する場合は、 $\hat{a}_g = a_g$ ($\hat{g} = 0, \dots, G-1$)となり、対角行列 $D_{1FF}(\theta)$ を以下のように定義する。

$$D_{1FF}(\theta) = \text{diag} \left(\overbrace{1, \dots, 1}^{g^* \times K}, e^{\hat{a}_{g^*+1}\theta}, \dots, \frac{e^{\hat{a}_{g^*+1}\theta} + K - 1}{K}, \dots, e^{\hat{a}_{G-1}\theta}, \dots, \frac{e^{\hat{a}_{G-1}\theta} + K - 1}{K} \right) \quad (15)$$

最後に、 $GK \times GK$ の行列 $C_{1FF}(\theta) = Q_{1FF} D_{1FF}(\theta)$ を定義する。以上の行列から、1FFスケジューリング下で

のサービスプロセスの GE limit $\Lambda_c(\theta)$ を得る事ができる.

$$\Lambda_c(\theta) = \log \delta_C(\theta) \quad (16)$$

$\delta_C(\theta)$ は $C_{1FF}(\theta)$ の最大固有値である. 以上より, 実効サービス帯域関数 $\xi_C(\theta)$ は以下のように定義できる.

$$\xi_C(\theta) = -\frac{\log \delta_C(-\theta)}{\theta} \quad (17)$$

3.3 パケットの待ち行列遅延について

実効帯域理論を用いて, 定常状態におけるパケットの待ち行列遅延のテイル分布を近似的に得る事ができる.

まず, 確率変数 D がタグユーザのパケットの待ち行列遅延であると定義する. パケットの待ち行列遅延のテイル分布 $P(D > n)$ の近似式は以下ようになる.

$$P(D > n) \approx \exp(\Lambda_C(-\theta^*)n) \quad (18)$$

また, θ^* は式 (19) の実数解である.

$$\Lambda_A(\theta) + \Lambda_C(-\theta) = 0 \quad (19)$$

4 解析結果

本節では, 1FF スケジューリング下でパラメータを変化させ, 同条件で解析とシミュレーションを行い, 数値結果を比較する. また解析環境は, パケットサイズが 250 B, モバイル端末数 (ユーザ数) が 10 個, ドップラー拡散周波数が 10 Hz, 1 タイムスロットが 1 ms とする. また, 図 1, 2 の ESBF とは実効サービス帯域関数を示し, EABF とは実効到着帯域関数を示している.

まず始めに, 実効サービス帯域関数の解析結果の図 1 を見る. 図 1 中にある実効サービス帯域関数の設定は, $\hat{\gamma}_1 = 2.0$ dB として 3 つのパラメータを用意した. Condition1 は $\bar{\gamma} = 12$ dB, Condition2 は $\bar{\gamma} = 24$ dB, Condition3 は $\bar{\gamma} = 7$ dB である. Condition1, Condition2, Condition3 を比較すると最小サービスレートはあまり変化がないが事が分かる. 反対に, 平均サービスレートは Condition1 が約 430 kbps, Condition2 が約 1070 kbps, Condition3 が約 220 kbps と大きく変化が現れた. つまり, 1FF スケジューリングの実効サービス帯域関数は平均 SNR 値によって最小サービスレートは影響を受けにくく, 平均サービスレートは影響を受けやすい事が分かる.

次に, 遅延のテイル分布の解析結果の図 2 を見る. 図 2 の実効サービス帯域関数のパラメータは Condition1 を使用し, 実効到着帯域関数のパラメータは Condition1 が $\alpha = 0.500$, $\beta = 0.980$, $\lambda = 0.300$ の場合であり, Condition2 が $\alpha = 0.100$, $\beta = 0.999$, $\lambda = 0.200$ の場合である. 図 2 から, 数値結果を比較すると各パラメータで小さな誤差はあるが, 傾きが近似している事が分かる. つまり, 提案した解析手法によりパケットの待ち行列遅延のテイル分布を推定できる事が分かる.

5 おわりに

本研究では 1FF スケジューリング下での無線ネットワークのパケットの待ち行列遅延の解析を行なっ

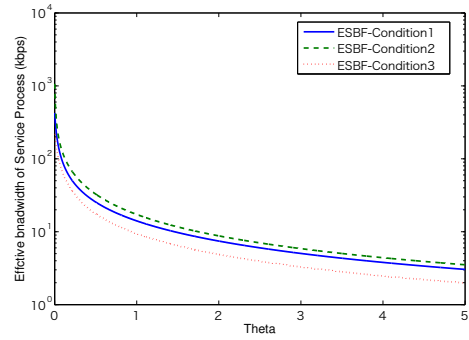


図 1 実効サービス帯域関数

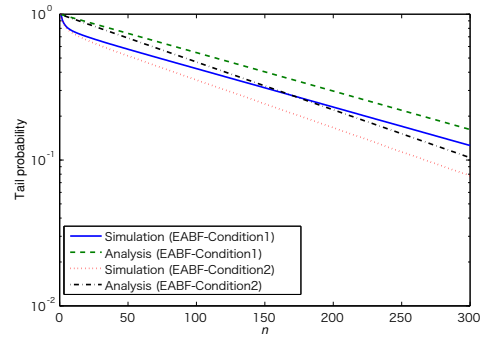


図 2 パケットの待ち行列遅延のテイル分布

た. そして, パケットの待ち行列遅延のモデル化を行い解析結果を得る事ができた. また, シミュレーション結果と比較をし, 提案手法の正確性も確認する事ができた.

参考文献

- [1] R. Knopp and P. A. Humblet, "Information capacity and power control in single-cell multiuser communications," *Proc. IEEE ICC*, vol. 1, pp. 331-335, 1995.
- [2] 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, pp. 1198-1206, 2005.
- [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, pp. 3220-3227, 2007.
- [4] Q. Liu, S. Zhong, and G. B. Giannakis, "Queuing with adaptive modulation and coding over wireless links: Cross-layer analysis and design," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, pp. 484-494, 2005.
- [5] 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, pp. 3214-3219, 2007.
- [6] C.-S. Chang, *Performance Guarantees in Communication Networks*. New York:Spring-Verlag, 2000.