

Dynamic Spectrum Accessにおける価格決定に関する研究

M2011MM037 小林英司

指導教員：石崎文雄

1 はじめに

近年、無線技術の発達によりモバイルサービスのアクセスが劇的に増加している。それに伴い、使用可能なスペクトルの欠如による通信効率の低下が問題となっている。今日の無線ネットワークでは、スペクトルは割り当ての規定に基づきライセンスを有するユーザ（以下、primary ユーザとする）へと割り当てられる。しかし、primary ユーザによって使用されるスペクトルは、時間や場所などの条件によって一部に集中しており、使用されずに残っているスペクトルが存在する。これをスペクトルホールと呼ぶ。primary ユーザは、割り当てられたスペクトルを使用していない時、ライセンスを有さないユーザ（以下、secondary ユーザとする）にスペクトルを提供する権利を持つ。secondary ユーザがスペクトルホールを好機的に使用するための手法として、Dynamic Spectrum Access が考えられている [1]。

Dynamic Spectrum Access とは、コグニティブ無線環境の下でスペクトルホールを感知し、secondary ユーザが使用するスペクトルを動的に移行することを可能とする技術である。コグニティブ無線とは、無線ネットワークにおいてスペクトルの利用を効率的なものに改善することを目的として考えられている技術であり、“操作する環境の相互関係に基づいて、送信者のパラメータを変化させることが可能な通信”と公式に定義されている [1]。コグニティブ無線の主な機能として以下のものが挙げられる。(1) 使用されていないスペクトルを検知し、他の secondary ユーザとの干渉がないようにスペクトルをシェアする (Spectrum sensing)。(2) 使用可能なスペクトルの中で最もユーザの要求に合うものを選択する (Spectrum management)。(3) primary ユーザの存在を検知した場合、secondary ユーザが現在使用しているスペクトルを空け、別のスペクトルに移行する。その際、通信が途切れないようにする (Spectrum mobility)。(4) 多数の secondary ユーザが同時に存在する状況で、スペクトルを提供するための適切なスケジューリング方法を与える (Spectrum sharing)。コグニティブ無線の最大の目的は、これらの技術を通じて最適なスペクトルを得ることである。

実際には多数の primary ユーザが存在するため、secondary ユーザにスペクトルを提供することについて競合している。そこで、スペクトルの価格決定をどのように行うかが問題となっている [2, 3]。多数の primary ユーザが競合するこの状況を、多数の企業と消費者から成る寡占市場として定式化する。スペクトルを提供することで利益が発生することになるが、それぞれの primary ユーザは、QoS の制約の下での自分の利益を最大化することを目的としている。先行研究では、ベルトラン競争の理論に基づき定式化されたベルトランゲームモデルを用いた価格決定のシミュレーションを行っている [2, 3]。ベル

トラン競争とは、寡占市場の状況化で戦略が連続的に存在し、各プレイヤーが価格で競争するというものである。数社の生産者による寡占市場において、生産者のうち最も低い価格を提示した者が市場の需要を独占するという状況下での利益最大化を図った価格決定に関する理論である。2つの primary ユーザと1つの secondary ユーザが存在する状況では、ベルトランゲームモデルを用いた価格決定の反復試行によって価格がナッシュ均衡へ収束していくことが確認されている。ナッシュ均衡とは、ある状況においての最適解を表すゲーム理論の一種の概念である。他のプレイヤーが戦略を変えない限り、より高い利益を得ることができない状態を表す。この状況下においては、すべてのプレイヤーが戦略を変更する動機を持たず均衡した状態となる。本研究では定式化についてベルトランゲームモデルを採用している。ベルトランゲームモデルの数式を用いた価格決定の反復試行によってナッシュ均衡に到達するためのアルゴリズムを用意し、パラメータを変化させて価格決定のシミュレーションを行う。primary ユーザが多数存在する状況でナッシュ均衡へ収束していく様子を調査し、パラメータを変えることで価格がどのように変化し、どの様にパラメータを設定した時 primary ユーザの利益が最大となるのか調査する。

2 システムモデル

2.1 primary ユーザ, secondary ユーザのモデル

ベルトランゲームモデルによる定式化を行うに当たり、プレイヤーは primary ユーザ、戦略は primary ユーザが提供するスペクトルの単位当たりの価格を示すものとする。N つの primary ユーザが存在し、secondary ユーザにスペクトルを提供する状況での価格決定について考える。チャンネルクオリティ γ_i 、ローカルコネクションの数 M_i を扱う primary ユーザ i は、利用可能なスペクトルを価格 p_i で secondary ユーザに提供することを望むものとする。secondary ユーザは伝送について適応変調を採用する。これは、周波数帯や環境によって変調方式を適応させるというものである。スペクトルの需要は、送信レートとスペクトルの価格に依存する。送信レートはチャンネルクオリティの値に基づいて動的に調整される。伝送のスペクトル効率 k_i は以下から得ることができる。

$$k_i = \log_2(1 + K\gamma_i), \quad K = \frac{1.5}{\ln(0.2/BER_i^{tar})} \quad (1)$$

BER_i^{tar} は、ターゲットとなる primary ユーザもしくは secondary ユーザのビットエラーレートを表す。

2.2 需要の定式化

secondary ユーザからのスペクトルの需要を定式化するため、secondary ユーザから得られる効用関数 U を決定

する．本研究では，効用関数として一般的に扱われる以下の式を使用する [4]．

$$U(\mathbf{b}) = \sum_{i=1}^N b_i k_i^{(s)} - \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^N b_i^2 + 2\nu \sum_{i \neq j} b_i b_j \right) - \sum_{i=1}^N p_i b_i \quad (2)$$

b_i は primary ユーザ i のスペクトルの提供総数， \mathbf{b} はそれぞれの primary ユーザからの b_i の集合を表す ($\mathbf{b} = b_1, \dots, b_i, \dots, b_N$)． $k_i^{(s)}$ は，secondary ユーザが primary ユーザ i のスペクトルを使用する際の伝送のスペクトル効率を表す．また，スペクトル代替可能性を ν で表している ($\nu \in [0.0, 1.0]$)．これは，secondary ユーザが，使用するスペクトルを移行することについての可否を表すものである． $\nu = 0.0$ ならば移行不可， $\nu = 1.0$ ならば自由に移行可能となる状態を表す．

次に，secondary ユーザが primary ユーザ i のスペクトルを使用する際の需要関数 D_i を導き出すため， $U(\mathbf{b})$ を b_i に関して以下の様に識別する．

$$\frac{\partial U(\mathbf{b})}{\partial b_i} = 0 = k_i^{(s)} - b_i - \nu \sum_{i \neq j} b_i - p_i \quad (3)$$

この等式を b_i について解くことで，すべての primary ユーザから提供されるスペクトルの価格による D_i を得ることができる． D_i は以下の様になる．

$$D_i(\mathbf{p}) = \frac{(k_i^{(s)} - p_i)(\nu(N-2) + 1) - \nu \sum_{i \neq j} (k_j^{(s)} - p_j)}{(1-\nu)(\nu(N-1) + 1)} \quad (4)$$

\mathbf{p} はそれぞれの primary ユーザから提示される価格の集合を表す ($\mathbf{p} = p_1, \dots, p_i, \dots, p_N$)．

2.3 ベルトランゲームモデル

ベルトランゲームモデルにおいてそれぞれのプレイヤーが得る結果は，primary ユーザが secondary ユーザにスペクトルを提供することで得られる利益である．

費用関数を表すため，primary ユーザが提供するスペクトルの QoS を考える必要がある．ある primary ユーザが有するスペクトルの一部を secondary ユーザとシェアしている場合，その primary ユーザが提供するスペクトルに QoS の低下が起こる．もし，QoS の低下によって，要求されたスペクトルが提供不可となる場合，その分は値引きをする．これをスペクトルをシェアする際のコストとして考える．収益関数 \mathcal{R}_i ，費用関数 \mathcal{C}_i は以下のように定義する．

$$\mathcal{R}_i = c_1 M_i, \quad \mathcal{C}_i(b_i) = c_2 M_i \left(B_i^{req} - \frac{W_i - b_i}{M_i} \right)^2 \quad (5)$$

c_1, c_2 は $\mathcal{R}_i, \mathcal{C}_i$ それぞれに重みを付けるための定数である． W_i は primary ユーザ i の提供可能な周波数スペクトルの帯域幅， B_i^{req} は要求される帯域幅， M_i は primary ユーザ i が扱うローカルコネクションの総数を表す．

primary ユーザ i の利益関数 \mathcal{P}_i ，収益関数 \mathcal{R}_i ，費用関数 \mathcal{C}_i の関係は以下の様に表すことができる．

$$\mathcal{P}_i(\mathbf{p}) = b_i p_i + \mathcal{R}_i - \mathcal{C}_i(b_i) \quad (6)$$

また， \mathcal{P}_i において， b_i は D_i に置き換えることができる．さらに， $\mathcal{R}_i, \mathcal{C}_i$ として定義された式 (5) を，式 (6) に代入することで， \mathcal{P}_i を以下の様に表すことができる．

$$\mathcal{P}_i(\mathbf{p}) = p_i D_i(\mathbf{p}) + c_1 M_i - c_2 M_i \left(B_i^{req} - \frac{W_i - D_i(\mathbf{p})}{M_i} \right)^2 \quad (7)$$

実際，他の primary ユーザの利益や戦略を知ることはできない．それぞれの primary ユーザは，他の primary ユーザが前回とった戦略と，secondary ユーザからのスペクトルの需要のみを知ることができる状態である．それゆえ，全ての primary ユーザが価格決定に満足し，利益を最大にするため，価格をナッシュ均衡へと近づけるためのアルゴリズムが必要となる．

2.4 ベルトランゲームの反復試行

t 回目の試行でライセンスユーザ i が提示する価格を $p_i[t]$ とする． i 以外の他の primary ユーザが提示する価格の集合を \mathbf{p}_{-i} で表す． $\mathbf{p}_{-i}[t]$ と $p_i[t]$ は一様に定義され，現在の価格と次回に提示するべき価格との関係は次の様に表される．

$$p_i[t+1] = p_i[t] + \alpha_i \left(\frac{\partial \mathcal{P}_i(\mathbf{p})}{\partial p_i} \right) \quad (8)$$

α_i は価格調整の速度 (学習レート) を表す．価格の残差を ϵ とし，反復試行における価格決定のアルゴリズムは以下の様に表される．

$$\frac{\partial \mathcal{P}_i(\mathbf{p})}{\partial p_i} \approx \frac{\mathcal{P}_i(\mathbf{p}_{-i}[t] \cup p_i[t] + \epsilon) - \mathcal{P}_i(\mathbf{p}_{-i}[t] \cup p_i[t] - \epsilon)}{2\epsilon} \quad (9)$$

式 (9) で表したアルゴリズムを式 (8) に代入することで得られる式を用いて価格決定の反復試行を行う．

3 シミュレーション

第二章で述べた数式，アルゴリズムを用いて，反復試行における価格決定のシミュレーションを行う．

第一に，primary ユーザ数，チャネルクオリティ，学習レート，スペクトル代替可能性の値をそれぞれ変化させ，価格がナッシュ均衡へ収束していく様子を調査し，より高い利益が得られるパラメータの設定について考察する．primary ユーザ数を変化させる時以外，primary ユーザ数は 2 とし，変化させるパラメータ以外の値は，すべての primary ユーザに同じ値を設定する．ここでは，それぞれの primary ユーザの提供可能な周波数スペクトルの帯域幅を 20MHz ($W_i = 20$)，ローカルコネクションの総数 $M_i = 10$ とする．また，チャネルクオリティ γ_i は 9~22dB，学習レート α_i は 0.1~0.7，スペクトル代替可能性 ν は 0.1~0.6 の間で変化させた．

第二に，primary ユーザ数を 100 とし，チャネルクオリティ，ローカルコネクションの総数，利用可能な周波数帯域幅について，primary ユーザ毎に異なる値を設定し，最も高い利益を得ることができる primary ユーザのパラメータを調査する．価格が負の値を取らないことを考慮し，チャネルクオリティ γ_i は 100~200，ローカルコ

ネクシジョンの総数 M_i は 5~105, 利用可能な周波数帯域幅 W_i は 200~300 の範囲で, primary ユーザ毎に異なる値を設定した. 学習レート $\alpha_i = 0.4$ とし, スペクトル代替可能性 ν の値は状況に応じて変化させている.

どちらのシミュレーションにおいてもビットエラーレート $BER_i^{tar} = 10^{-4}$, 要求される帯域幅は 2Mbps ($B_i^{req} = 2$), 定数 $c_1 = c_2 = 2$, 反復試行における最初の価格 $p_i[0] = 1$ とし, 反復試行の回数は $t = 20$ とした. また, ナッシュ均衡に達した時の価格を式 (4) に代入することで得られる値を需要値, 式 (7) に代入することで得られる値を利益値とする.

グラフは, 図 1~図 4 については, 縦軸を価格, 横軸を反復試行の回数を表すものとする. 図 5~図 10 については, 縦軸を primary ユーザがナッシュ均衡に達した時の価格と需要値もしくは利益値, 横軸を primary ユーザ毎のチャンネルオリティ, ローカルコネクシジョンの総数, 利用可能な周波数帯域幅の値を表すものとする.

3.1 primary ユーザの数による結果

チャンネルオリティ $\gamma_i = 22$, 学習レート $\alpha_i = 0.4$, スペクトル代替可能性 $\nu = 0.1$ とし, primary ユーザ数 N を, $N = 2, 5, 10, 100$ と設定し, それぞれの場合で価格決定のシミュレーションを行った. シミュレーション結果を図 1 で表した.

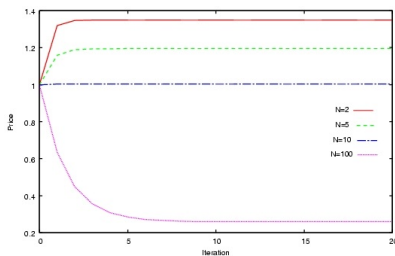


図 1 primary ユーザ数によるシミュレーション結果

3.2 チャンネルオリティの値による結果

primary ユーザ数 $N = 2$, 学習レート $\alpha_i = 0.4$, スペクトル代替可能性 $\nu = 0.1$ とし, チャンネルオリティ γ_i の値を $\gamma_i = 9, 14, 18, 22$ で変化させ, 価格決定のシミュレーションを行った. $\gamma_i = 9, 14, 18, 22$ と設定した時のシミュレーション結果を図 2 で表した.

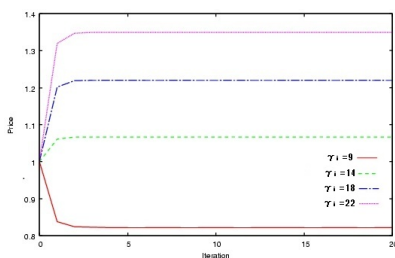


図 2 チャンネルオリティによるシミュレーション結果

3.3 学習レートの値による結果

primary ユーザ数 $N = 2$, チャンネルオリティ $\gamma_i = 22$, スペクトル代替可能性 $\nu = 0.1$ とし, 学習レート α_i の値を $\alpha_i = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ で変化させ, 価格決定のシミュレーションを行った. $\alpha_i = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ と設定した時のシミュレーション結果を図 3 で表した.

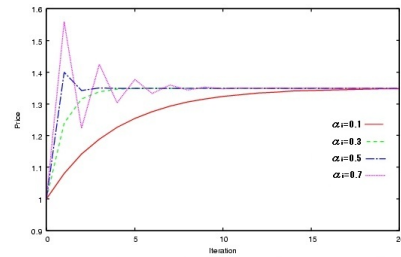


図 3 学習レートの値によるシミュレーション結果

3.4 スペクトル代替可能性の値による結果

primary ユーザ数 $N = 2$, チャンネルオリティ $\gamma_i = 22$, 学習レート $\alpha_i = 0.4$ とし, スペクトル代替可能性 ν の値を $\nu = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ で変化させ, 価格決定のシミュレーションを行った. $\nu = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ と設定した時のシミュレーション結果を図 4 で表した.

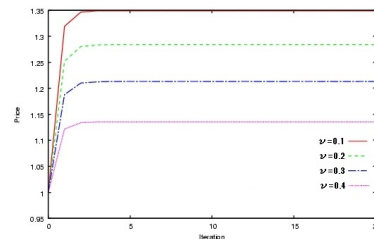


図 4 スペクトル代替可能性の値によるシミュレーション結果

3.5 チャンネルオリティの値 (ユーザ毎に異なる値) による結果

チャンネルオリティを primary ユーザ毎に異なる値に設定した時の結果を図 5, 図 6 に示す.

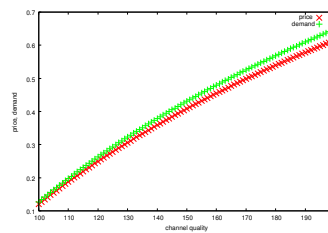


図 5 価格, 需要値

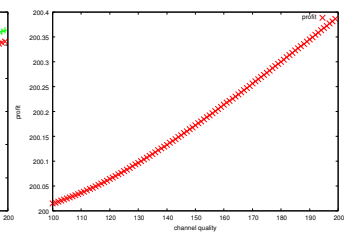


図 6 利益値

チャンネルオリティの値が大きいほどナッシュ均衡に達した時の価格は高くなるが, 価格が高いほど大きな需要が得られることがわかる. この結果から, チャンネルク

オリティに関しては、価格と比べチャンネルクオリティの値の方がより需要に影響していることがわかる。

3.6 ローカルコネクションの総数による結果

ローカルコネクションの総数を primary ユーザ毎に異なる値に設定した時の結果を図 7, 図 8 に示す。

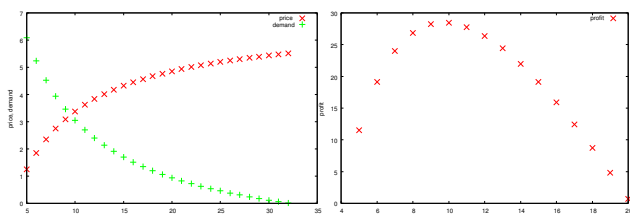


図 7 価格, 需要値

図 8 利益値

価格が高くなるほど需要は小さくなっている。最も大きな利益が得られるのは、価格と需要値が均衡する辺りとなった。

3.7 利用可能な周波数帯域幅による結果

利用可能な周波数帯域幅を primary ユーザ毎に異なる値に設定した時の結果を図 9, 図 10 に示す。

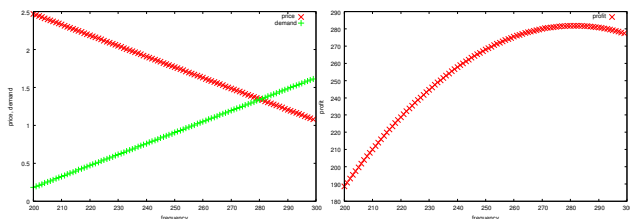


図 9 価格, 需要値

図 10 利益値

こちらでも、価格が高くなるほど需要は小さくなり、最も大きな利益が得られるのは、価格と需要値が均衡する辺りとなった。

3.8 考察

以上のシミュレーション結果から、それぞれのパラメータを変化させることによって価格決定にどのような影響を与えるか、わかったことを以下にまとめる。

- primary ユーザの数が多いほど価格は低くなり、少ないほど価格は高くなる。
- チャンネルクオリティの値が大きいか小さいほど価格は高くなる、小さいほど価格は低くなる。
- primary ユーザ数にもよるが、ユーザを 2 とした場合、学習レートの値は 0.4 ~ 0.5 の時、価格の収束の速度が最も早い。
- スペクトル代替可能性の値が大きいか小さいほど価格は低くなり、小さいほど価格は高くなる。

以上より、高い利益を得るためには、primary ユーザの数が少なく、チャンネルクオリティの値が大きく、スペクトル代替可能性の値が小さいことが条件となることがわかった。

また、primary ユーザ毎にパラメータの値が異なる場合、最も大きな利益を得るためのパラメータの設定方法として以下のことがわかった。

- チャンネルクオリティに関して、primary ユーザ数 100 の状況では、値を大きくするほど価格は高くなるが需要も大きくなり、結果として大きな利益が得られる。
- ローカルコネクションの総数、利用可能な周波数帯域幅に関して、値を大きくするほど価格は高くなるが需要は小さくなっていく。価格と需要値が均衡した primary ユーザが最も高い利益を得られる。

4 おわりに

本研究では、ベルトランゲームモデルに基づく数式をプログラム化し、パラメータを変化させつつ反復試行による価格決定のシミュレーションを行い、高い利益が得られる場合を調査した。

シミュレーション結果から、primary ユーザの数が少なく、チャンネルクオリティの値が大きく、スペクトル代替可能性の値が小さいほど価格が高くなることがわかった。学習レートは価格の収束する速度に影響する。

また、primary ユーザ数が多数存在し、primary ユーザ毎に異なるパラメータの値が設定された状況では、ローカルコネクションの総数、利用可能な周波数帯域幅に関して、価格と需要が均衡するように設定されたユーザが最も大きな利益を得ることができた。しかし、今回のパラメータ設定ではこのような結果となったが、設定を変えて行うことでどうなるか調査し、最大の利益を得るための条件を導き出すことを今後の課題とする。

参考文献

- [1] Ian F. Akyildiz, W. Lee, Mehmet C. Vuran, S. Mohanty: "NeXT generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey", *Computer Networks*, Vol. 50, pp. 2127-2159, 2006.
- [2] D. Niyato, E. Hossain: "Optimal Price Competition for Spectrum Sharing in Cognitive Radio: A Dynamic Game-Theoretic Approach", *IEEE Proceedings of GLOBECOM 2007*, pp. 4625-4629, 2007.
- [3] D. Niyato, E. Hossain: "Competitive Pricing for Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: Dynamic Game, Inefficiency of Nash Equilibrium, and Collusion", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 26, No. 1, pp. 192-202, 2008.
- [4] N. Singh and X. Vives: "Price and quantity competition in a differentiated duopoly", *RAND Journal of Economics*, Vol. 15, No. 4, pp. 546-554, 1984.