1999年度日本オペレーションズ・リサーチ学会
秋季研究発表会

IP網の資源割当て型サービスを対象としたユーザ間の公平性を満足する課金方式

NTTサービスインテグレーション基盤研究所　上山　憲昭　KAMIYAMA Noriaki

1　はじめに

IP網においてエンドエンド間で網資源を割当て、通信品質の保証を行うサービスが検討されているが[1]、課金方式は通信サービスに対する需要に大きな影響を与え、ネットワーク設備設計や輻輳制御にも影響することから、その検討、評価は極めて重要である。

網資源を割当てない従来のIP網では、輻輳時には通信品質の劣化が全ユーザに波及するため、特定のユーザのみが他のユーザよりも良質なサービスを享受することがなく、定額課金を用いてもユーザ間の公平感が損なわれることはなかった。ところが、網資源の割当てを行う場合、輻輳時には既に収容されたユーザは網資源が確保されているため安定した通信品質を享受することができるが、新たにサービスを要求したユーザは空き資源の不足から呼損となり、サービスを全く受けることができない。毎月同じ料金を支払う定額課金の場合、各ユーザが同じ料金を支払っているにもかかわらず、ユーザごとにサービスを要求してから実際にサービスが提供されるまでの待ち時間が異なり、ユーザ間の不公平感が大きくなる。

一方、ユーザ間の公平性を満足する一つの方法として、各ユーザに各々のサービス提供に伴って発生したコストに応じた料金を課すという考え方がある[2]。要求帯域の大きく異なる多種多様なサービスが提供されるIP網に適用した場合、単位帯域・単位時間あたりの料金を定め、帯域を確保するセッションに対して、帯域、時間に比例した料金を課することを意味する。しかし、各々の必要帯域格差に伴う料金格差がユーザの感じる対価と対応しない。

そこで本稿では、IP網上の資源割当て型サービスに対してユーザ間の公平性を満足する新しい課金方式を提案する。

2　提案方式

通信セッションを課金単位とする。すなわち、割当て帯域やセッション保留時間には無関係に、個々の通信セッションに対して料金を設定する。網はサービス内容(通信品質等)、最大通信時間、料金をメニューとしてユーザに掲示する。ユーザは最大通信時間以内であれば、任意の時間そのサービスを利用することができ、実際に利用した時間とは無関係に掲示された料金のみを支払う。提案方式ではサービス時間と料金が比例しないため、ユーザが一旦確保した網資源を解放しないという問題に対処する必要がある。そこで個々の通信セッションに最大通信時間を設ける。ユーザは掲示された内容でサービスを受けるか否かの二項選択を行うものとする。

網は同時接続数に応じたセッション価格を用意し、ユーザが通信サービスを要求した瞬間の同時接続数に応じた価格を掲示する。このセッション価格セットを、網収入が最大化する最適化問題をとくことにより決定する。最適価格セットはサービスの需要量(サービス要求の発生率)、ユーザの需要弾力性に依存するため、固定間隔の制御周期を設け、制御周期の境界において次周期内の需要と価格弾力性を推定し、次周期内で適用する価格セットを算出する。その結果、提案方式は網収入を最大化し需要を平滑化する。

2.1　モデル化

資源割当て型サービスが単一種類、単一QOSクラスで提供されていると仮定する。網はK回線の即時式回線群とみなすことができ、サービス要求がポアソン過程に従い発生するものとする。ユーザは掲示された料金からサービスを受けるか否かを判断し、受ける判断をした場合には資源が割当てられサービスが開始される。サービス時間の分布は平均$\frac{1}{\mu}$の指数分布に従うとする。

網収入を最大化する最適セッション価格セットを算出するためには、(i)ユーザのサービス享受選択行動をモデル化し、セッション価格に対する享受選択確率を求めること、(ii)サービスの需要(サービス要求発生率)を予測すること、が必要である。ユーザの選択行動モデルとして非集計行動モデル[3]を用い、需要予測に、数量化理論I類のカルマンフィルタ表現[4]を用いる。

[ユーザ選択行動モデル]

同時接続数がkのときにユーザに掲示されるセッション価格をx_kとする。本稿では単一種サービス、単一サービスクラスを想定しているため、料金以外に選択行動に影響を与えると考えられる全ての要因を選択肢固有ダミー変数に含めて考えることができる。サービスを受けるという選択肢を1、受けないという選択肢を2とし、同時接続数がkのときにサービス要求を出したユーザセグメントsに属するユーザが、各々の場合に得る確定効用を$V_1^{(s,k)}$、$V_2^{(s,k)}$とすると、$V_1^{(s,k)}=\theta_1^{(s)}+\theta_2^{(s)}x_k$、$V_2^{(s,k)}=0$となる。ただし、選択肢固有ダミー変数(選択肢1が絶えず1で、選択肢2が絶えず0)を第一番目の特性変数、料金を第二番目の特性変数とおいた。セグメントsに属するユーザのサービス享受選択確率$q_k^{(s)}$は、

$$
\begin{aligned}
q_k^{(s)} &= \left(1+e^{V_2^{(s,k)}-V_1^{(s,k)}}\right)^{-1} \\
&= \left(1+e^{-\theta_1^{(s)}-\theta_2^{(s)}x_k}\right)^{-1} \qquad (1)
\end{aligned}
$$

となる。効用パラメータ$\theta_1^{(s)},\theta_2^{(s)}$を求めるには、実際に特

性変数値をユーザに与えたときの選択行動結果の複数サンプルから最尤推定を行う。

[需要予測]

セグメント s の制御区間 n におけるサービス要求平均到着率 $\lambda_n^{(s)}$ の推定式を導出する。$y_n^{(s)}$ を区間 n 内のセグメント s に属するユーザからの発生サービス要求数とする。数量化理論 I 類では、被説明変数 $y_n^{(s)}$ を複数の説明変数 (離散量変数) で定式化するが、各々の説明変数をアイテムと呼び、各アイテムが実際にとる値をカテゴリと呼ぶ [5]。いま、$y_n^{(s)}$ が p 個のアイテムで説明され、アイテム i が k_i 個のカテゴリを有するとする。各アイテムは k_i のカテゴリのうちどれか一つに属するため、アイテム i がカテゴリ j に属するときにのみ値 1 をとり、それ以外では 0 となるダミー変数 $\delta_{i,j}^{(n)}$ を定義することができる。定数項 $\beta_0^{(s)}$ とダミー変数 $\delta_{i,j}^{(n)}$ に対する重みパラメータ $\beta_{i,j}^{(s)}$、誤差項 $\epsilon_n^{(s)}$ を導入し、$y_n^{(s)}$ は再帰式、

$$y_n^{(s)} = \beta_0^{(s)} + \sum_{i=1}^{p} \sum_{j=1}^{k_i-1} \delta_{i,j}^{(n)} \beta_{i,j}^{(s)} + \epsilon_n^{(s)} \tag{2}$$

で表現される。ただし、アイテム i は必ずどれか一つのカテゴリに属するため、必要なダミー変数量は $k_i - 1$ となる点に注意する必要がある。

数量化理論 I 類を、提案する課金方式の需要予測部分に用いる場合、需要の長期変動に対する追随を考慮する必要がある。そのためには、$n-1$ までの観測結果が得られている場合に、次周期 n の予測とパラメータの更新を再帰的に行えるカルマンフィルタを用いるのが有効である [4]。カルマンフィルタは時系列モデルの状態空間表現を基礎にしており、非常に応用範囲の広い予測システムである。回帰分析や数量化理論 I 類もカルマンフィルタにより表現することができ [5]、本稿でもカルマンフィルタによる表現法を用いる。以下に予測、更新式を列挙する。

$$\begin{aligned}
\hat{y_n^{(s)}} &= \boldsymbol{x}_n' \boldsymbol{\beta}_{n-1}^{(s)} && (3)\\
\hat{\boldsymbol{P}}_n &= \boldsymbol{P}_{n-1} + \boldsymbol{Q}_n && (4)\\
\boldsymbol{K}_n &= \frac{\hat{\boldsymbol{P}}_n \boldsymbol{x}_n}{\boldsymbol{x}_n' \hat{\boldsymbol{P}}_n \boldsymbol{x}_n + 1} && (5)\\
\boldsymbol{P}_n &= \hat{\boldsymbol{P}}_n - \boldsymbol{K}_n \boldsymbol{x}_n' \hat{\boldsymbol{P}}_n && (6)\\
\boldsymbol{\beta}_n^{(s)} &= \boldsymbol{\beta}_{n-1}^{(s)} + \boldsymbol{K}_n \left(y_{n-1}^{(s)} - \hat{y_{n-1}^{(s)}} \right) && (7)
\end{aligned}$$

$y_n^{(s)}$ は制御区間 n にユーザセグメント s より発生したサービス要求数の実測値であり、$\hat{y_n^{(s)}}$ はその予測値である。$\boldsymbol{\beta}_n^{(s)}$ は重みパラメータベクトル $\boldsymbol{\beta}^{(s)}$ の時刻 n における推定値である。また、$\boldsymbol{P}_n$ は $\boldsymbol{\beta}_n^{(s)}$ の共分散行列 (ダミー変数ベクトル $\boldsymbol{x}_n$ の次元数を m とすると、$m \times m$ 次元の行列) であり、$\boldsymbol{K}_n$ はカルマンゲイン (m 次元ベクトル)、$\boldsymbol{Q}_n$ はシステムノイズの共分散行列 ($m \times m$ 次元) である。実用に際しては、$\boldsymbol{Q}_n$ を n に無関係な正定値行列として与え、$\boldsymbol{P}_n$ を全てのセグメント s に対して共通に使用し、その初期値として、$\boldsymbol{P}_0 = \kappa \boldsymbol{I}$($\kappa$ は十分に大きな正の実数であり $\boldsymbol{I}$ は単位行列) を与える。また $\boldsymbol{\beta}_0^{(s)}$ としてゼロベクトルを与える。

なお、各制御区間内のサービス要求到着数はその曜日や時間帯に応じて大きく変化すると考えられるため、推定誤差を小さくするために、サービス要求到着数を対数変換したものを観測変数 $y_n^{(s)}$ として用いる。そして得られた到着数の推定値を制御区間長 T_c で割ったものをサービス要求到着率 $\lambda_n^{(s)}$ とする。すなわち、$\lambda_n^{(s)} = \frac{e^{y_n^{(s)}}}{T_c}$ により $\lambda_n^{(s)}$ を決定する。

[最適価格セットの導出]

網状態 (同時接続数) が k のときの網へのサービス到着率 (ユーザが掲示された価格でサービスを受ける判断をし、実際に資源の割当てが発生するレート) を Λ_k とすると (添え字 n は省略する)、$\Lambda_k = \sum_{s=1}^{S} \lambda_n^{(s)} q_k^{(s)}$ となる。ただし S はセグメント数である。ユーザセグメントとは無関係に個々の平均サービス継続時間は $\frac{1}{\mu}$ なので、状態が k のときのサービス終了率は $k\mu$ となる。ゆえに、同時接続数 k の定常状態確率 p_k は、

$$p_k = p_0 \alpha_k \prod_{l=0}^{k-1} \Lambda_l, \quad 1 \le k \le K \tag{8}$$

と得られる。ただし、

$$\begin{aligned}
p_0 &= \left(1 + \sum_{m=1}^{K} \alpha_m \prod_{l=0}^{m-1} \Lambda_l \right)^{-1} && (9)\\
\alpha_k &\equiv \frac{1}{\mu^k k!} && (10)
\end{aligned}$$

である。次に、網が単位時間に得ることができる収入 R を最大化する最適料金メニュー $x_0, \cdots, x_{K-1}$ を考える。これは、$x_0, \cdots, x_{K-1}$ に関しての以下に示す K 次元非線形計画問題の解となる。

$$\begin{aligned}
&\max_{x_0,\cdots,x_{K-1}} R\\
&\quad = \max_{x_0,\cdots,x_{K-1}} \sum_{k=0}^{K-1} \Lambda_k x_k p_k\\
&\quad = \max_{x_0,\cdots,x_{K-1}} p_0 \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k x_k \prod_{l=0}^{k} \Lambda_l
\end{aligned} \tag{11}$$

参考文献

[1] P. P. White, "RSVP and Integrated Services in the Internet: A Tutorial," *IEEE Commun. Mag.*, vol.34, pp.100-106, 1997.

[2] B. M. Mitchell and I. Vogelsang, "Telecommunications pricing: Theory and practice," *Cambridge University Press*, 1991.

[3] M. Ben-Akiva and S. R. Lerman, "Discrete Choice Analysis," *The MIT Press*, 1997.

[4] A. C. Harvey, "Forecasting, Structural Time Series Models and the Kalmann Filter," Cambridge University Press, 1989.

[5] T. Yada, I. Nakajima, I. Ide, and H. Murakami, "Forecasting Traffic Volumes for Intelligent Telecommunication Services Based on Service Characteristics," *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E81-B, No.12, 1998.