

TR-AC-0058

008

通信ネットワークのリソース配分の最適化

恩田 和幸

2001. 7. 6

ATR環境適応通信研究所

目次

1. まえがき	1
2. ネットワークリソースと経路トラヒックの最適配分	1
2.1 通信ネットワークモデル	1
2.2 最適化問題	2
3. 高次元アルゴリズム	3
3.1 ハミルトニアン	3
3.2 運動方程式	4
3.3 拘束条件	4
4. 適用事例	4
4.1 計算条件	4
4.2 計算結果	5
5. まとめ	7
参考文献	7

1. まえがき

インターネットの急速な普及に伴い、ユーザ（企業、個人等）が、パケット通信ネットワークを構築するケースが増えている。このような状況において、限られた予算（資源）の中でネットワーク性能を最大化する設備容量設計及びネットワーク性能を最大限生かすトラフィック負荷配分等に対するユーザの要求が高まっている。

一方、通信ネットワークの設計法（設備容量設計、トポロジー設計及びトラフィックエンジニアリング等々）は古くから研究され、既に様々な方法や提案が存在する。しかし、それらの方法がユーザに採り入れられている例は少ない。現実のユーザネットワークの多くは、待ち行列理論に基づく伝統的な手法[1][2]とユーザの経験則によって設計され、シミュレーション評価・実運用を通して設計上のボトルネックを洗い出すといった試行錯誤的な方法が用いられる場合が多い。この方法では、ネットワーク性能は必ずしも最大化されない。

このような背景の下、我々は、パケット通信ネットワークを対象としてネットワークリソース及びトラフィックの最適配分方法を提案する。我々の方法は、通信ネットワークの最適資源配分問題を定義し、これを解くことによって最適ナリソース配分及びトラフィック経路配分を算出するものである。本問題の最適解は、与えられるリソース制約条件及びトラフィック生起条件の下でネットワーク性能を最大化する。提案法の特徴は、最適解の探索に高次元アルゴリズム（HA）[4]を適用することである。HAを用いることによって、多変数のネットワークに対しても総合的に最適解を導くことができる。

2. ネットワークリソースと経路トラフィックの最適配分

2.1 通信ネットワークモデル

最適資源配分問題を定義するために、通信ネットワークをモデル化する。現実の通信ネットワークは様々な構成要素から成り立つが、ここでは基本構成要素をモデル化の対象とする（図2.1）。すなわち、ネットワークは、ノードと向きを持つリンクから構成されるものとする。そして、ネットワーク内の任意のノード間でパケット通信が行われるものとする。パケットは、送信元ノードにおいてある生起率に従って生起し、とりうる複数の経路を使って宛先ノードに向けて送信される。

中継ノードは、あるルーティングレートで到着パケットの経路を選択する（ルーティング）。経路決定されたパケットは、あるフォワーディングレートで出力リンクに転送される（フォワーディング）。リンクは、そのリンクに設定された容量の範囲内でパケットを次のノードへ転送する。このときパケットは、リンク長に比例した伝搬遅延をうけるものとする。パケット生起率、ルーティングレート、フォワーディングレート及びリンク容量は、すべて同じ単位[packets/単位時間]で取扱う。

本ネットワークモデルにおいて、パケットトラフィックの処理能力は、各ノードのルーティングレート、フォワーディングレート、及び各リンクの容量によって決まる。本報告では、これらの3つのパケット処理能力をネットワークリソースとして取扱うこととする。

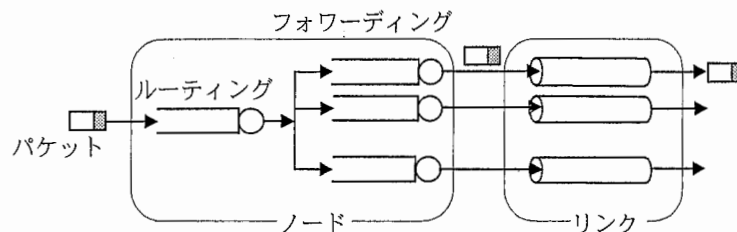


図2.1 ネットワークモデル

2.2 最適化問題

最適なネットワークリソース配分及びトラヒック経路配分を求めるための資源配分問題を定義する。

(1) 最適化変数

4種類の配分率（ルーティングレート配分率，フォワーディングレート配分率，リンク容量配分率及びトラヒック経路配分率）を最適化変数として定義する。これらの配分率に従って，ネットワークリソース及びトラヒックを配分するものとする。

・ルーティングレート配分率

ネットワークで使用可能なルーティングレートの総量 M_r を，各ノードのルーティング処理部 r に配分することを考える。このとき， r のルーティングレート配分率 x_r を次式で定義する。

$$x_r = \frac{\mu_r}{M_r} \quad (1)$$

ここで， μ_r は M_r のうち r に配分されるルーティングレートである。

・フォワーディングレート配分率

ネットワークで使用可能なフォワーディングレートの総量 M_f を，各ノードのフォワーディング処理部 f に配分することを考える。このとき， f のフォワーディングレート配分率 x_f を次式で定義する。

$$x_f = \frac{\mu_f}{M_f} \quad (2)$$

ここで， μ_f は M_f のうちある f に配分されるフォワーディングレートである。

・リンク容量配分率

ネットワークで使用可能な容量の総量 B を，各リンク l に配分することを考える。このとき，リンク容量配分率 x_l を次式で定義する。

$$x_l = \frac{b_l}{B} \quad (3)$$

ここで， b_l は B のうちリンク l に配分される容量である。

・トラヒック経路配分率

ノード s からノード d へのパケット生起率 λ_{sd} を， $s \sim d$ 間で選択しうる経路 p に配分することを考える。このとき，経路 p のトラヒック経路配分率 x_p を次式で定義する。

$$x_p = \frac{\lambda_p}{\lambda_{sd}} \quad (4)$$

ここで， λ_p は λ_{sd} のうち p へ配分されるパケット生起率である。

(2) コスト関数

文献[3]では，リンクにおける遅延時間，トラヒック到着率及び最大利用率等に着目してデータネットワークのトポロジー設計のためのコスト関数を定義している。これを参考として，我々の問題のコスト関数 V を次式のように定義する。

$$V = w_1 D + w_2 U_r + w_3 U_f + w_4 U_l = f(x_r, x_f, x_l, x_p) \quad (5)$$

ここで， D は送受信間パケット転送遅延時間の平均を経路の平均サービス時間で正規化した値， U_r はルーティング部利用率の最大値， U_f はフォワーディング部利用率の最大値， U_l はリンク容量利用率の最大値，そして $w_1 \sim w_4$ は重み係数である。

(3) 制約条件

制約条件を以下のように与える.

$$\sum_{r=1}^{N_r} x_r = 1, \sum_{f=1}^{N_f} x_f = 1, \sum_{l=1}^{N_l} x_l = 1, \sum_{p \in P_{sd}} x_p = 1 \quad (6)$$

$$0 \leq x_r \leq 1, 0 \leq x_f \leq 1, 0 \leq x_l \leq 1, 0 \leq x_p \leq 1 \quad (7)$$

ここで, N_r , N_f 及び N_l は, 各々 x_r , x_f 及び x_l の総数, P_{sd} はノード s ~ ノード d 間でとりうる経路の集合である.

以上のように定義した最適資源配分問題を, ネットワークトポロジー, ルーティングレートの総和 M_r , フォワーディングレートの総和 M_f , リンク容量の総和 B 及びトラフィック生起条件を与えて解く.

本問題は, 対象とする通信ネットワークの規模が大きいほど, あるいはトポロジーが複雑であるほど最適化変数 (特に x_p) が増大する傾向にあるため, 解法に十分なスケラビリティが要求される. 最適化問題の解法には様々なものが存在するが, 多変数の問題に適用できるものは少ない. 解法に合わせて問題を部分分解することも考えられるが, 部分分解の仕方に注意深い工夫を要する. そこで, 我々は, ATR で開発された高次元アルゴリズム (HA) [4] を解法として適用する. HA を用いることで, 多変数のネットワークの場合でも問題を部分分解することなく, ネットワーク性能を最大化する最適解を一括して求めることができる.

3. 高次元アルゴリズム[4]

高次元アルゴリズム (HA : Hamitonian algorithm) は, 最適化問題を解くヒューリスティックな解法の一つである. HA は, 最適化問題を力学系の運動に置き換え, 運動の持つ性質を利用して問題の最適解を導く. 具体的には, 最適化問題における最適化されるべき変数を力学系の位置に, そしてコスト関数をそのポテンシャルエネルギーに対応させる. 更に, 新しい変数として運動量を導入する (高次元化). ポテンシャルエネルギーと運動エネルギーの和で与えられるハミルトニアンの下で力学系の運動を解き, 当初の問題の最適解を探索する. このようにすると, ポテンシャルエネルギーの小さい領域で力学系の存在確率が大きくなり, 最適解が求めやすくなる.

他の最適解探索法 (例えば線形計画法 [5] や遺伝的アルゴリズム等 [6]) と比べて, HA は以下のような利点を持つ.

- ・多変数の最適化問題に向く.
- ・局所的な安定解に捕まり難い.
- ・パラメータの注意深い制御を必要としない.

3.1 ハミルトニアン

本問題では, ハミルトニアン H を次式で定義する.

$$H = V(x_r, x_f, x_l, x_p) + T(p_r, p_f, p_l, p_p) \quad (8)$$

ここで, $V(x_r, x_f, x_l, x_p)$ は 2.2 で定義したコスト関数であり, $T(p_r, p_f, p_l, p_p)$ は運動項である. p_r , p_f , p_l 及び p_p は, 各々最適化変数 x_r , x_f , x_l 及び x_p の仮想的運動量である. 運動項は次式で定義する.

$$T(p_r, p_f, p_l, p_p) = \frac{1}{2} (\sum p_r^2 + \sum p_f^2 + \sum p_l^2 + \sum p_p^2) \quad (9)$$

3.2 運動方程式

各最適化変数に加わる力は、コスト関数 V は以下の式によって求める。

$$\frac{d^2 x_r}{dt^2} = -\frac{\partial V}{\partial x_r} \quad (10)$$

$$\frac{d^2 x_f}{dt^2} = -\frac{\partial V}{\partial x_f} \quad (11)$$

$$\frac{d^2 x_l}{dt^2} = -\frac{\partial V}{\partial x_l} \quad (12)$$

$$\frac{d^2 x_p}{dt^2} = -\frac{\partial V}{\partial x_p} \quad (13)$$

パケット生起をポアソン過程と仮定したとき、式(10)~(13)は解析的に求めることができる。

3.3 拘束条件

最適化変数 x_r , x_f , x_l 及び x_p は全て実数変数として取り扱う。各最適化変数が値域 $[0,1]$ で運動するように拘束条件を導入する。また、安定解を得るためにエネルギー減衰を加える。

4. 適用事例

4.1 計算条件

(1) トポロジー条件

2種類のネットワークトポロジーを設定した(図4.1)。

- Network_A ; (25, 88)
- Network_B ; (25, 56)

Network_Aは、部分ネットワークがバックボーンネットワークで接続されたネットワークの例、Network_Bは、不規則なトポロジーを持つネットワークの例である。()内の数字は、ノード数とリンク数を表わす。トポロジーの周辺部分のノードをエッジノード(EN)、中央部分のノードをバックボーンノード(BN)とした。ノード座標は、リンクの伝搬遅延時間がルーティング時間等に比べて十分無視できる程度に設定した。

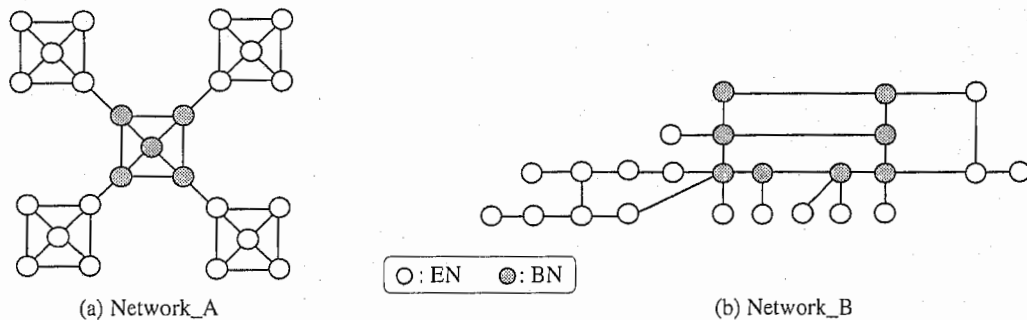


図4.1 トポロジー条件

(2) トラフィック生起条件

全ノード間にポアソン過程にしたがうパケットトラフィックが生起すると仮定した。そしてネットワーク全体の総パケット生起率 λ を定め、これを各ノード間に振り分けた。本例では $\lambda = 5$ として、以下の2種類のパケット生起パターンを設定した。

- Traffic_A ; (1 : 3 : 9)
- Traffic_B ; (9 : 3 : 1)

Traffic_AはBN間パケット生起が多い例、Traffic_BはEN間パケット生起が多い例である。()内

の数字は、EN間、EN～BN間及びBN間のパケット生起率の総和の比率を表わす。

(3) その他の条件

ネットワークリソースの制約条件は、 $M_r=M_f=B=100$ [packets/単位時間]とした。ノード間の経路候補は、経路長が最小ホップ数+2の経路までとした。この時、Network_A、Network_Bの最適化変数の総数は各々16,533、1,293となる。HAの繰返し回数は30,000回に設定した（本適用事例の場合、30,000回の繰返し計算で、コスト関数の最小値が安定的に得られることを確認している）。

4.2 計算結果

Network_Aについて最適化計算されたネットワークリソース及びトラヒックの配分結果を図4.2に、Network_Bに対する同結果を図4.3に示す。各結果から、以下のことが確認できる。

- (1) 図4.2、図4.3ともに、BN（あるいは中継ノード）のルーティング部により多くのルーティングレートが配分されている。
- (2) BN～BN間（あるいは中継ノード間）のリンクにより多くの容量が配分されている。
- (3) 多くのルーティングレートが配分されているBN（あるいは中継ノード）により多くのトラヒックが配分されている。
- (4) Network_Aの各計算結果にほぼ対象性がみられる。

(1)～(3)から、トポロジー条件、トラヒック生起条件によらず、ネットワーク内のトラヒックが集中する部分により多くのネットワークリソースが配分され、そしてこのリソースを有効利用するようにトラヒックも配分される結果が得られたことがわかる。これらの結果は、ネットワークの設備容量設計に提案法が有効であることを示している。なお、フォワーディングレートについても、(2)と同様の結果が得られている。

(4)は、Network_Aのトポロジーに対称性があることから妥当な結果である。この結果は、最適化変数の総数が10,000を超えるようなネットワークに対しても提案法が十分適用できることを示している。

次に、経路長に着目したトラヒック経路配分結果を図4.4に示す。図4.4から以下のことが言える。

- (1) 長い経路が存在しても、比較的短い経路により多くのトラヒックが配分されている。
- (2) トラヒック生起条件が異なると、経路へのトラヒック配分結果も異なる。

長い経路へのトラヒック配分は、コスト項 D を増大させる。その意味で、(1)は妥当な結果であると言える。(2)は、最短経路へのトラヒック配分が必ずしもネットワーク性能を最大化させるわけではなく、トラヒック生起条件に応じて最適な経路選択を行うことでより良いネットワーク性能が得られることを示している。提案法は、トラヒック条件に適応的な経路選択に対しても有効であると考えられる。

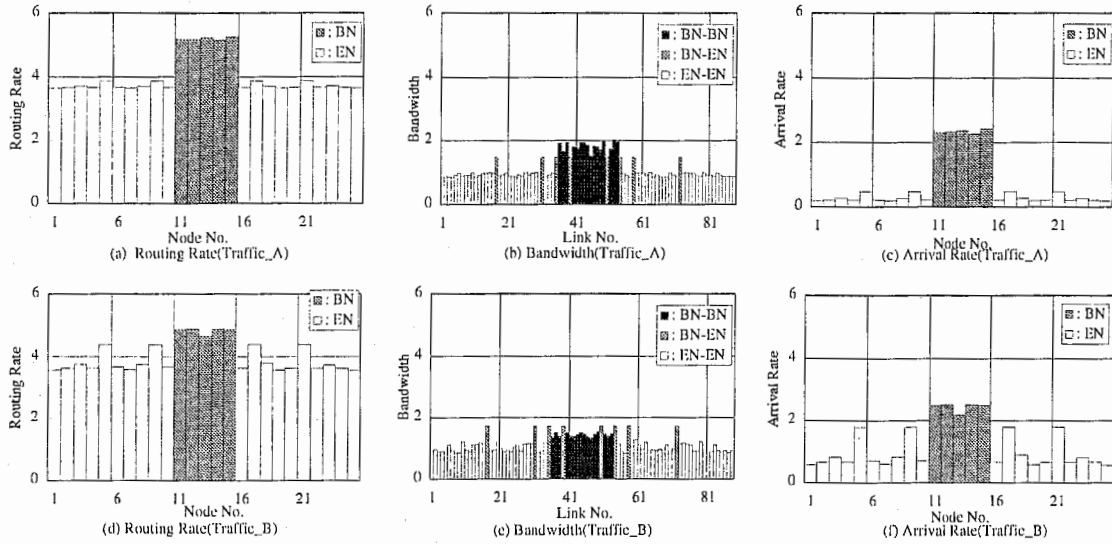


図4.2 Network_Aのルーティングレート, リンク帯域, トラフィック配分結果

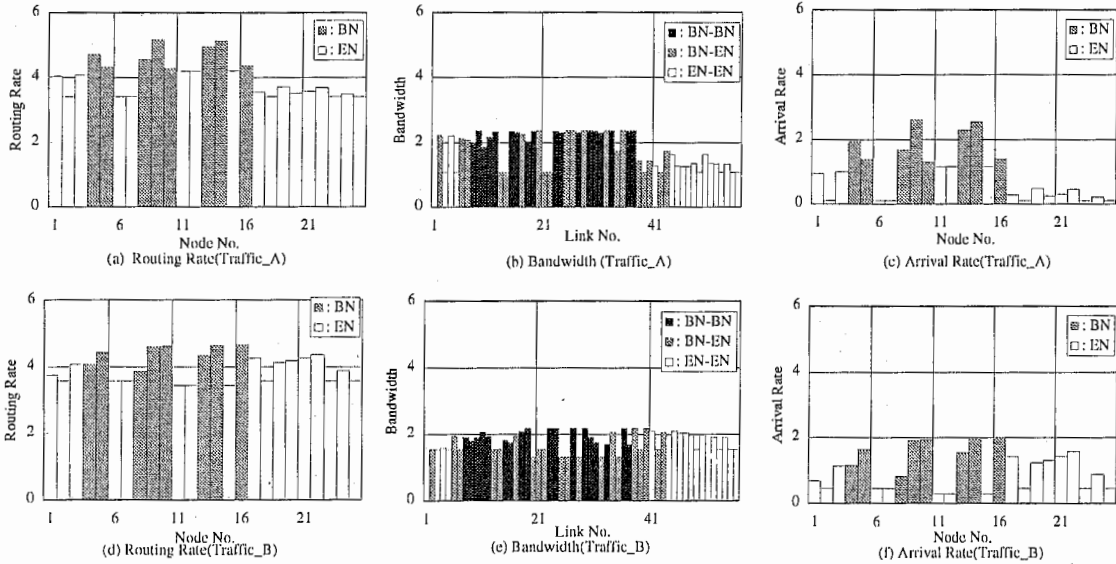


図4.3 Network_Bのルーティングレート, リンク帯域, トラフィック配分結果

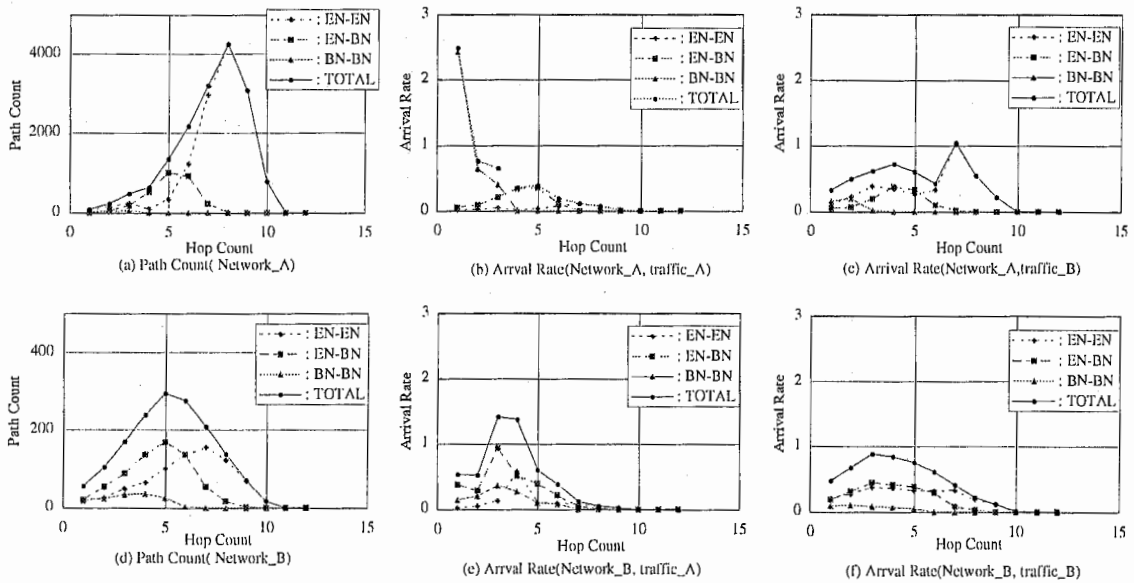


図4.4 経路へのトラフィック配分結果

5. まとめ

我々が提案するネットワークリソース及びトラヒック経路配分を最適化する方法を示した。2種類のトポロジー条件及び2種類のトラヒック生起条件に対して提案法による最適化計算を行った。その結果から、与えた条件によらず提案法が有効であることを確認した。本最適化計算は、全て計算機上で行なえることから、提案法は、ユーザでは最適化が困難な多変数のネットワーク設計に対して特に有効であると考えられる。

参考文献

- [1] 秋山, “通信網工学”, コロナ社 1989.
- [2] 秋丸, 川島, “情報通信トラヒック”, オーム社1990.
- [3] D.Bertsekas and R.Gallager, Data networks, Prentice-Hall, 1992.
- [4] 新上, “高次元アルゴリズム”, July 1999 vol.31, No.7/bit.
- [5] 吉川他, “工学における数値計算法”, 日本理工出版会 1988.
- [6] 北野, “遺伝的アルゴリズム”, 産業図書 1993.