

AT-3-6

## アドホック・メッシュネットワークのトラヒック理論的アプローチ

An Approach from Queuing Theory for Ad Hoc and Wireless Mesh Networks

岡田啓

Hiraku Okada

名古屋大学 エコトピア科学研究所  
EcoTopia Science Institute, Nagoya University

## 1 まえがき

アドホック・メッシュネットワークは分散配置されたノードが自律的に動作することで構築される無線ネットワークである [1]. 特別なインフラストラクチャや集中管理機能を必要とせずにスケラブルなネットワークを構築できるため, 災害時における臨時ネットワーク, センサネットワークやスマートグリッドのバックボーンネットワークなど, さまざまな用途が検討されている.

アドホック・メッシュネットワークでは, 相互接続される分散型のネットワークであり, 各ノードはお互いに通信相手にも干渉源にも成り得る. 通信品質はあるノード間の通信路特性のみではなく, 他のノードからの干渉によっても左右される. そのため, さまざまな要因がからみあって性能が決まるという複雑な特徴を有する.

本稿ではアドホック・メッシュネットワークをトラヒック理論の観点から考えてみる. アドホック・メッシュネットワークを簡易なトラヒックモデルで表すことで, その特徴を明かにする. さらに, トラヒック理論における大群化効果をアドホック・メッシュネットワークで得ることができるのかについても検討する.

## 2 トラヒック理論と大群化効果

トラヒック理論では, ノードなどの動作 (状態) をモデル化し, 時間的変化を確率過程を用いて表現する [2]. 図1にトラヒック理論によるモデル化を示す. 情報が到着すると, いったん待ち行列に並ぶことになる. 待ち行列に並んでいる情報は順に処理され, それが終わると退去することになる. このようなトラヒックモデルはケンドールの表記により表される. 到着 (生起) 間隔分布を A, 処理 (保留) 時間分布を B, 出線数を  $s$ , 待ち行列の大きさを  $K$ , 入力之母集団の大きさを  $n$  とすると, トラヒックモデルは  $A/B/s/K/n$  となる. 時間分布としては, 指数分布 M, 一定分布 D, 一般分布 G などがある.

ここで, 到着間隔分布, および処理時間分布が指数分布に従い, 待ち行列を持たない即時式マルコフモデル  $M/M/s/s$  を考える. このモデルでは, 到着した情報は出線に空きがある場合は直ちに処理されるが, 出線に空きが無い場合は呼損として扱われる. 即時式マルコフモデルの呼損率  $B$  はアラン B 式と呼ばれ,

$$B = \frac{G^s}{s!} \sum_{x=0}^{s-1} \frac{G^x}{x!} \quad (1)$$



図1 トラヒック理論によるモデル化

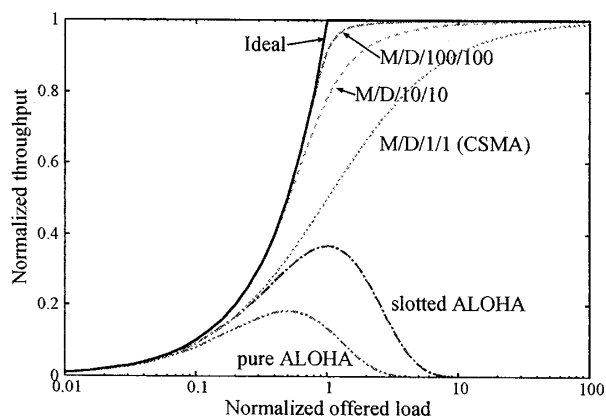


図2 スループットの大群化効果

で求められる. ここで,  $G$  は到着する情報の呼量を示す. また, 回線能率 (スループット)  $\eta$  は呼損率を用い,

$$\eta = \frac{G(1-B)}{s} \quad (2)$$

と表される.

即時式マルコフモデルには, 出線数が大きくなればなるほど能率が向上するという大群化効果がある. 呼損率をある値に固定したとき, 出線数を大きくするとスループットが向上する. 図2では少し視点を変え,  $M/D/1/1$  でのオフロード対スループット特性における大群化効果を示す. 出線数を大きくすればスループットが向上していることが分かる. 到着した情報が通信容量の範囲内ですべて呼損とならずに処理される場合を理想特性とする. 出線数が無限大に近づけば即時式マルコフモデルのスループットは理想特性に近づくことが分かる. このように, 大群化効果によるスループット向上を図るためには,  $M/D/s/s$  において  $s$  を大きくすればよいことになる. なお, パケットの衝突が発生しない理想的な CSMA (Carrier Sense Multiple Access) は  $M/D/1/1$  と一致する. 参考として, pure ALOHA, および slotted ALOHA の特性も図2に示してある.

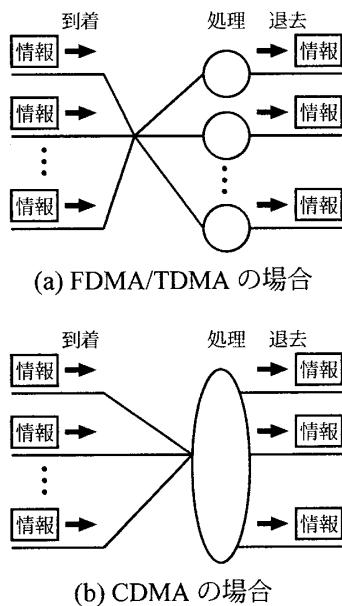


図3 無線環境で M/D/s/s を実現するには

3 アドホック・メッシュネットワークでの大群化効果

無線環境で M/D/s/s による大群化効果を得るにはどのようにしたらよいのか? 例えば, FDMA (Frequency Division Multiple Access) や TDMA (Time Division Multiple Access) においてチャンネル (出線に相当) 数を増やした場合, トラヒックモデルは  $s \times M/D/1/1$  となる. 単純にチャンネルを増やしただけでは大群化効果は得られない. また, 伝送レートを速くした場合は  $M/(D/s)/1/1$  となり, 処理時間が短くなるだけで大群化効果は得られない.

M/D/s/s を実現するためには, FDMA や TDMA の場合は図 3(a) のように動的チャンネル選択により空いているチャンネルを見つけて送信することが必要になる. または, 図 3(b) のように CDMA (Code Division Multiple Access) を用いて時間, 周波数を共有することで M/D/s/s を実現できるかもしれない.

では, アドホック・メッシュネットワークで大群化効果を得ることを考える. まず, 出線数を増やすためには周波数の異なる複数のチャンネルを用いることが挙げられる. これは, IEEE 802.11 のように複数のチャンネルが利用できる無線方式を用いればよい. また, OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) やマルチユーザ MIMO (Multi-Input Multi-Output) を用いることも考えられる. そして, M/D/s/s を実現するためには, 動的チャンネル割り当てや動的リソース制御が必要になる.

4 具体例

本章では, まず初めにトラヒック理論を用いた解析例として, アドホック・メッシュネットワークにおける競合・隠れノードの影響を簡易なモデルを用いて解析する. そして, 大群化効果が得られる例として, VANET (Vehicular Ad Hoc Network) における動的チャンネル選択について述べる.

4.1 競合・隠れノードを考慮した簡易解析 [3]

各ノードにおける新規パケットの生起間隔は, 生起率  $\lambda$  の指数分布に従い, パケット長は長さ  $h$  の固定とする. 新規パケットのノードあたりのオフアドロードは  $g = \lambda h$  となる. 理想的な CSMA を仮定する. この理想的な CSMA では, 同じチャンネルを共有する競合ノード間で発生したパケットは理想的にスケジューリングされており, 生起した順に衝突なくチャンネルに送出される. 隠れノードからのパケット送出が無い場合, 同じチャンネルを共有する隣接競合ノード間での 1 ホップ伝送は, 各ノードに送信バッファが無い場合は待ち行列モデル  $M/D/s/s/m$  と, 無限大の送信バッファが有る場合は  $M/D/s//m$  と見なすことができる. ここで,  $s$  はチャンネルの実効数であり,  $m$  は送信ノードを含めた競合ノード数である.

ここで,  $g_e$  を実効トラヒック量とする. これは, ノードあたり, 実効チャンネルに送信される新規と再送の両方のパケットのトラヒック量を示し,  $g_e = N a s g$  と表される. ここで,  $a$  はトラヒック分割係数,  $N$  はあるパケットが受信ノードで正しく受け取られるまでに要する平均送信回数である. 状態占有確率を  $\pi_k$  とすると, 待ち行列モデル  $M/D/s/s/m$  では

$$\pi_k = \frac{\binom{m}{k} g_e^k}{\sum_{i=0}^s \binom{m}{i} g_e^i} \tag{3}$$

と表される. この確率を用いることで, 実際に送信中であるパケットのトラヒック量は

$$G_s = \sum_{k=0}^s k \pi_k \tag{4}$$

となる. 待ち行列モデル  $M/D/s//m$  では呼損が生じないため  $G_s = m g_e$  となる.

パケットの送信失敗の原因は隠れノードから送信されるパケットとの衝突であると仮定する. ノードあたり, あるチャンネルで伝送中の平均トラヒック量は  $G_s/sm$  となる. 隠れノードは送信ノードにおけるチャンネルの状態 (使用中または空き) を無視してパケットを送信する. この動作は ALOHA 方式でのチャンネルアクセスと同じと見なすことができる. そのため, 隠れノードからパケット長の 2 倍の時間, パケットが送出されなければ, 送信ノードから送信したパケットは受信ノードにて正しく受け取ることができる. パケット生起間隔は指数分布に従うと仮定しているため, パケット送信成功確率  $Q_s$  は,

$$Q_s = \{e^{-2G_s/sm}\}^n = e^{-2nG_s/sm} \tag{5}$$

と表される. ここで,  $n$  は隠れノード数である. そして, 平均送信回数は

$$N = \frac{1}{Q_s} = e^{2nG_s/sm} \tag{6}$$

となる.

表1 シミュレーション諸元 (競合・隠れノードの影響評価)

simulator	QualNet [4]
simulation duration	180 s
buffer size	50 kbytes
MAC/PHY	IEEE 802.11b
transmission rate	2 Mbps
application	
packet generation interval	exponential
packet length	fixed (1024 bytes)

スループット  $\eta$  を、ノードあたり、すべてのチャンネルにおいて送信に成功する総トラフィック量と定義する。前述の通り、ノードあたり、あるチャンネルにおいて伝送中であるパケットのトラフィック量は  $G_s/sm$  となる。これに、パケット送信成功確率  $Q_s$  を乗算し、トラフィック分割係数  $a$  で割ることでスループットは求められ、

$$\eta = \frac{1}{a} \frac{G_s}{sm} Q_s = \frac{1}{a} \frac{G_s}{sm} e^{-2nG_s/sm} \quad (7)$$

となる。

ここで、過負荷時、つまりノードあたりのオフアードロード  $g$  が無限大であるときの性能を調べてみる。理想的な CSMA を仮定しているため、過負荷状況では伝送中のパケットの平均トラフィック量は実効チャンネル数と等しくなる。 $G_s$  を  $s$  で置き換えることで、過負荷時のパケット送信成功確率は

$$\hat{Q}_s = e^{-2n/m} \quad (8)$$

となる。よって、スループットは

$$\hat{\eta} = \frac{1}{am} e^{-2n/m} \quad (9)$$

となる。

スループットの最大値  $\eta_{\max}$  は (7) を微分することで得られ、 $n \neq 0$  のとき、 $G_s = sm/2n$  で最大となり、

$$\eta_{\max} = \frac{1}{2an} e^{-1} \quad (10)$$

である。 $n = 0$  のときは  $G_s$  が無限大のとき、つまり過負荷時に最大となり、

$$\eta_{\max} = \hat{\eta} = \frac{1}{am} \quad (11)$$

となる。

式 (9)~(11) より、競合ノード数が増加すると最大スループットは逆比例で減少するものの、過負荷時スループットは増加することがわかる。これは、競合ノード数が増えると各ノードが実際にチャンネルにパケットを送出するトラフィック量が減り、このことが隠れノードからのトラフィック量も減少する。その結果、隠れノードからのパケットとの衝突確率が減るためである。これに対し、

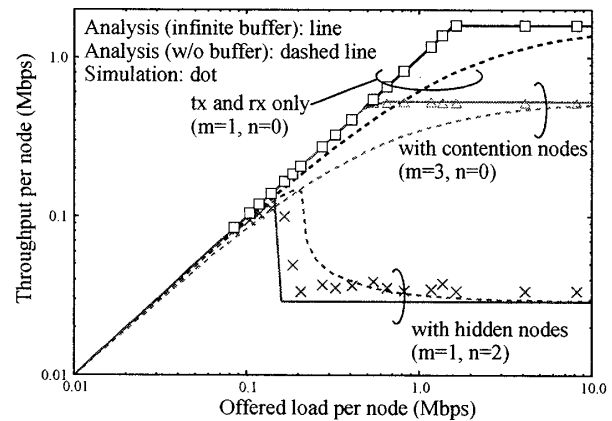


図4 競合・隠れノードの影響

隠れノード数が増加すると、最大スループットは逆比例で、過負荷時スループットは指数的に劣化する。隠れ端末問題がさらされ端末問題より性能劣化に大きく影響することが、これらの式からも確認できる。

図4に、送信ノードと受信ノードのみの場合 ( $m = 1, n = 0$ )、競合ノードが存在する場合 ( $m = 3, n = 0$ )、隠れノードが存在する場合 ( $m = 1, n = 2$ ) の解析結果とシミュレーション結果を示す。シミュレーション諸元を表1に示す。解析結果のオフアードロード、スループットは、送信ノードと受信ノードのみの場合のシミュレーション結果の最大値で規格化している。この図より、絶対的な値は若干異なるものの、解析結果とシミュレーション結果の傾向が似ていることが分かる。このように、簡易な解析を用いても、複雑なアドホック・メッシュネットワークの特徴を分析することが可能である。

#### 4.2 VANET における動的チャンネル選択 [5]

本節では、VANET において、インタフェースボンディングによる複数チャンネル、複数インタフェースを用いたシステムのための動的チャンネル選択手法 IA-DCS (Interference-Aware Dynamic Channel Selection) を紹介する。

IA-DCS では、各ノードはチャンネル使用率  $R_{ch}$  と伝送失敗率  $R_f$  を測定し、これらから導出される ETDT (Expected Transmission Delay Time) をチャンネル選択のためのメトリックとして用いる。ETDT は、競合ノードとのチャンネルアクセス時に生じる送信待ち時間と、隠れノードから送信されたパケットとの衝突による再送回数の増加の両方を考慮して、パケットが伝送されるのに要する遅延時間と定義する。利用可能な複数のチャンネルの中から ETDT が最も短いチャンネルを選択することで、周辺ノードからの干渉による影響を和らげることができ、スループット向上につながる。

ETDT は送信待ち時間と平均送信回数の積として求めることができる。まず初めにトラフィックモデルを用いて各ノードにおける送信待ち時間を求める。各チャンネルでは同時に一つのパケットしか送信できないため、トラフィックモデルにおける出線数は1である。また、各ノードはチャンネルが使用中の際に送信を待つためのバッファを実

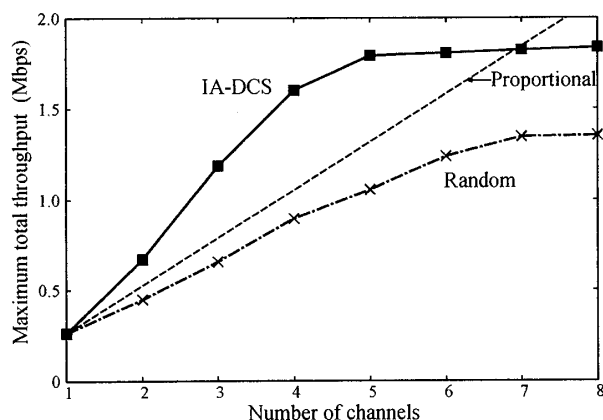


図5 チャンネル数を変化させたときの最大総スループット特性 [5]

インタフェースに持っている。そこで、リンクに送出されるパケットは M/M/1/2 トラヒックモデルに従うと仮定する。IEEE 802.11 のランダムバックオフや ACK の返信による影響を考慮に入れず、ポアソン分布に従いパケットが送信され、パケット長が指数分布に従うときにこの仮定は成立する。再送パケットも含め、このリンクに付加されるトラヒック量を  $\rho$  とするとき、M/M/1/2 トラヒックモデルでの平均待ち時間  $W$  は次式で表される。

$$W = \frac{\rho(1+\rho)}{1-\rho^3} \quad (12)$$

ここで、平均パケット長を 1 に正規化している。また、トラヒック量  $\rho$  は

$$\rho = \frac{\sqrt{(1+3R_{ch})/(1-R_{ch})} - 1}{2} \quad (13)$$

として表される。パケットの伝送に成功するまでの平均送信回数  $N_{suc}$  は伝送失敗率  $R_f$  を用いて

$$N_{suc} = \frac{1}{1-R_f} \quad (14)$$

と表される。これより、ETDT は次式となる。

$$ETDT = N_{suc} \cdot W \quad (15)$$

図 5 にチャンネル数を変化させたときの最大総スループット特性を示す。シミュレーション諸元を表 2 に示す。この図にはチャンネル数が 1 のときの結果をもとにチャンネル数に対して最大総スループット特性が比例して増加した場合の特性、およびランダムにチャンネルを選択した場合の特性も示してある。IA-DCS を用いた場合、比例関係以上に最大総スループット特性が向上しており、競合・隠れノードの影響を考慮してチャンネル選択することで大群化効果が得られていることが分かる。これに対し、ランダムに選択した場合は大群化効果が得られず、さらに競合・隠れノードの影響を受けているために比例関係よりも特性が悪くなっている。

表2 シミュレーション諸元 (IA-DCS)

simulator	QualNet [4]
simulation duration	600 s
mobility	NETSIM [6]
routing	AODV
MAC/PHY	IEEE 802.11b
transmission rate	2 Mbps
pass loss model	two ray
fading	Rayleigh
application	constant bit rate
packet size	512 bytes
transmission interval	0.2 s

## 5 むすび

本稿ではトラヒック理論の観点からアドホック・メッシュネットワークの特性について議論した。簡易な解析モデルを用いてアドホック・メッシュネットワークにおける競合・隠れノードの影響を評価し、シミュレーションと傾向が一致することを示した。また、複数チャンネル、複数インタフェースを用いたシステムにおいて、動的チャンネル選択方式を導入することで、アドホック・メッシュネットワークでも大群化効果が得られることを明らかにした。

アドホック・メッシュネットワークはさまざまな要素がからみあってその性能が決定される。しかし、その仕組みを単純化すれば解析モデルを当てはめることができ、理論的な裏付けのもと、性能向上を図ることも可能である。

## 参考文献

- [1] 間瀬憲一, 阪田史郎, アドホック・メッシュネットワーク, コロナ社, 2007.
- [2] 秋丸春夫, 川島幸之助, 情報通信トラヒック基礎と応用, 電気通信協会, 2000.
- [3] H. Okada, and K. Mase, "Performance analysis of wireless mesh networks with three sector antennas," International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing, pp.1232-1236, 2010.
- [4] Scalable Network Technologie, <http://www.scalable-networks.com/>.
- [5] 五井智明, 岡田啓, 間瀬憲一, "VANET のための周辺ノードからの干渉を考慮した動的チャンネル選択システム," 信学論 (B), vol.J93-B, no.2, pp.143-152, Feb. 2010.
- [6] Demonstration of Traf-Netsim for Traffice Operations Management, <http://ntl.bts.gov/DOCS/netsim.html>.