

セルラ移動体通信網のトラヒックモデル

高木 英明

1. はじめに

古い空想物語の例で言えば、鉄腕アトムが空を飛びながら地上のお茶の水博士と話したり、バットマンが無人のバットマンカーを呼び寄せたりするときには、移動体が通信している。

現実的な例では、ラジコン、ワイヤレスマイク、コードレス電話、ポケベル、PHS、携帯電話（最近では「ケータイ」と片仮名で書く）、カーナビや、船、飛行機、人工衛星との通信も移動体通信である [1,2]。これらの移動体通信の本質的特性は無線通信であり、有線通信を用いた伝統的な電話、ファックス、パソコン通信、LAN、銀行のオンラインシステム、インターネット等と区別される。

有線通信では銅線や光ファイバーのような「線」を通して情報が伝えられるのに対し、無線通信が情報を伝える媒体は真空そのものであり、その電磁氣的性質の周期的な変化が真空中を伝わるのが電磁波（簡単に「電波」という）である。従って、無線通信は電波の届く所はどこでも通信できるという利点があるが、同時に、周りの電磁氣的活動の影響を受けやすく（雑音、電波の干渉）、また周りに影響を与えやすい（病院内での携帯電話の使用禁止）ことになる。トラヒックモデルの観点からは、有線通信の回線容量が近年の光ファイバー技術の飛躍的進歩によりほとんど無限大であるのに対し、無線通信で利用できる電波の周波数帯は有限である（「電波の窓」と呼ばれる 1~10GHz 帯より低い周波数は雑音や電離層の影響を受けやすく、それより高い周波数は空気や雨による減衰がある）。また、同じ地域で同じ周波数帯を同じ符号を使って同じ時間に、複数のユーザが通信することはできない。従って、無線通信においては、有限の資源を複数のユーザに効果的に配分するという OR の応用が生まれることになる。

本稿では、多種多様な無線通信システムのうちセルラ移動体通信網について、そのトラヒックモデルとそれに関連する確率モデルを紹介する。この通信網は、陸上のサービス地域をいくつかのセルと呼ばれる無線ゾーンに分割し、各セル内の固定基地局とそのセル内の移動体が通信するシステムである。セルラ方式は、昔の自動車電話、現在の携帯電話と PHS、近い将来のパーソナル通信等で用いられている。無線通信の各サービスには、国際及び国内機関により、使用可能な周波数帯が指定される。与えられた周波数帯を、各ユーザの使用に必要な幅で細分化して、それぞれをチャンネルと呼ぶ（テレビの「チャンネル」と同じ意味である）。どの程度まで細かく分割できるかは、無線通信技術の問題であり、トラヒック工学は、与えられたチャンネルを効率良くユーザに配分することに係わることになる。

本稿は網羅的サーベイを目指したものではないので、著者の主観に基づき、最も基本的なモデルのみを記述し、文献の引用も最小限にとどめた。

2. チャンネル使用方式と性能尺度

本章では、各セルにチャンネルを割り当てる方式と、割り当てられたチャンネルを複数のユーザに使用させる多元接続方式を分類し、サービスの提供者（通信事業者）とユーザ（加入者）から見た性能の尺度について述べる。

2.1 チャンネル割り当て法

あるサービスに使用が許可されたすべてのチャンネルをサービス域全体のユーザで共有する「大ゾーン方式」は、資源を最大限利用できるという「規模の経済」と、移動するユーザの位置の追跡が不要であるという管理上の利点があるものの、無線通信網の場合には、電波の出力を大きくしなければならず、従って干渉が増加するという欠点があるので、採用されていない。

サービス域をセルと呼ばれる小ゾーンで敷き詰め、

各セルで低出力の電波を使用すると、十分に離れたセル間では、同じチャンネルを同時に用いても干渉が生じない。この性質を利用して、地理的に離れた別のセルに同じチャンネルを割り当てることができる。これを周波数の空間的再利用という。割り当てパターンには、同じチャンネルを1, 2, または3セル分だけ離れたセルに割り当てる3, 7, 13周波数繰り返し方式等がある。

チャンネルのセルへの割り当てを運用期間中は変えない方式を固定チャンネル割り当てという。固定割り当てはもちろん簡単であるが、トラヒック量が一時的にセル間で不均衡になっても、空いているチャンネルをやりとりすることはできない。トラヒック量の時間的変化に対応してチャンネルを割り当てる方式を動的チャンネル割り当てと呼ぶ。これによりチャンネルの有効利用が図れるが、集中管理でこれを行なうためには、サービス域全体に渡って時々刻々のトラヒック量とチャンネルの使用状況を把握している必要がある。また、分散管理では安定化と大域的最適化が難しい。

2.2 多元接続方式

1つのセルの中で基地局からすべての移動体に送信する放送チャンネルでは、送信を基地局だけで完全に制御できるので、例えば時分割多重で各ユーザに送信すればよい。これに対して、セル内の多数の移動体から基地局へ送信する多元接続チャンネルでは、送信の衝突を避けるために様々な方式が用いられている。一般に、チャンネル資源を複数のユーザが共同使用するときには、(1)分割型方式、(2)競争型方式、(3)制御型方式、及びそれらの混合方式が考えられ、それぞれ適用対象に応じて利点と欠点がある。このうちセルラ移動体通信網で主に使われているのは分割型方式である。

分割型方式とは、利用可能なすべてのチャンネルをユーザ毎に分割して専有使用させるもので、フレームと呼ばれる一定時間を細分化する時間分割多元接続(TDMA)、周波数帯を細分化する振動数分割多元接続(FDMA)、情報をデジタル符号化するとき「直交する」符号を割り当てる符号分割多元接続(CDMA)等がある。2.1で述べた周波数の空間的再利用は空間分割多元接続(SDMA)である。分割方式の利点は、電話のような定常的トラヒックに対して伝送の量・質・遅延を保証できることであるが、欠点は、一時的に使用していないとき(例えば、電話で無音声のとき)でも資源を割り当てておかなければならない無駄が生じること、活動しているユーザの数の管理が

必要であること等である。

多元接続チャンネルにおける競争型方式の代表は、パケット無線網(特に衛星通信)用のALOHAとイーサネットLAN用のCSMAである。後者を地上パケット無線網に用いようとする、電波が届かない所にいるユーザからの送信が感知できないという隠れ端末問題が生じる。ポーリングやトークンパッシングのような制御型方式は、無線網では制御情報の伝搬に時間がかかるので、即時通信が要求される電話網には適さないと思われる。

混合方式の代表である予約方式は、例えば、短い予約用スロットを各ユーザがALOHA方式で用いてデータ送信時刻の予約を行ない、データ自体の送信は予約どおりに時間分割で行なうことにする方式である。これは、衛星による船舶・航空機用無線通信システムであるINMARSATで採用されている。また、ALOHA方式とCDMA方式を併用する拡散ALOHA方式では、時間的にかなり重なった送信でも符号が干渉しなければ受信が成功するので効率が良い。後者の性能解析にはトラヒック理論と情報理論を融合して用いる。

2.3 トラヒック性能の尺度

回線の伝送品質が非常に良い有線網と異なり、無線チャンネルのビットエラー率は雑音や干渉のため高くなり、それがトラヒック量と相互依存する。具体的には、データ通信の場合、エラーによる再送信が増えてトラヒック量が増加する(音声なら多少のエラーは無視できる)。また、CDMA網ではセル内外からの送信者の数が干渉のレベルとしてビットエラー率に影響する。

通話中にいくつものセルに渡って移動するユーザにとって最も良いサービスは、(相手が話し中の場合を除いて)電話がすぐにかかり、通話が最後まで完了することである。これを実現するためには、サービス提供者(通信事業者)は、同時に通話すると考えられるユーザの数だけチャンネルを用意しておかなければならないが、サービスに許可されるチャンネルの数はそれよりもはるかに少ない。従って、通信事業者の目的は、与えられたチャンネルを効率良くユーザに割り当てることにより、彼らの満足度を一定以上に保ちながら、できるだけ多くの加入者を収容することである。

あるセルにいるユーザが電話をかけるとき、そのセルに割り当てられているすべてのチャンネルが使用中であるために電話がかからないことを、新しい呼の呼損という。うまいぐあいに空きチャンネルがあつて電話が

かかったとする。ユーザが通話中に隣りのセルに移動するときには、移動先のセルのチャンネルに乗り移らなければならない。これをハンドオフといい、移動先のセルに空きチャンネルがないためにハンドオフができないことをハンドオフ呼損という。通信事業者の主たる関心事は新しい呼の呼損率とハンドオフ呼損率の低減であると思われる。しかしながら、通話中にいくつものセルに渡って移動するユーザはセルの境界を認識するわけではないので、彼にとって重要なことは、通話中にどこかでハンドオフ呼損が起り通話が強制切断されるか、通話完了できるかということである。

3. トラヒックモデル

本章では、周波数分割セルラ通信網のトラヒックモデルを紹介する。伝統的なトラヒック工学の用語に従って、それぞれの通話を「呼(こ)」と呼ぶことにする。

3.1 単一セルのモデル

c 個のチャンネルが割り当てられた1つのセルを考える [3]。そこでは新しい呼とハンドオフ呼がそれぞれ率 λ と λ' の独立な Poisson 過程として発生すると仮定する。ここで、チャンネルの使用に関して、ハンドオフ呼を新しい呼よりも優遇することにする。なぜならば、既に進行中の通話を継続させる方が新しい呼を開始させるよりも重要であると考えられるからである(高速道路が混んでくると入り口を閉鎖するのと同じ理由である)。ハンドオフ呼を優先的に扱う1つの方法は、 c 個のチャンネルのうちガードチャンネルと呼ばれる g 個のチャンネルをハンドオフ呼専用にとっておく保留優先方式である。すなわち、ハンドオフ呼はすべてのチャンネルを使うことができるが、新しい呼は $c-g$ 個までのチャンネルしか使うことができないようにする。新しい呼とハンドオフ呼の通話時間は平均が $1/\mu$ の同じ指数分布に従うと仮定する(指数分布の「無記憶性」により、途中の任意時点からの残余通話時間も同じ指数分布に従う)。このセルにおいて通話中の呼の数をセルの「状態」とすれば、その推移は出生死滅過程と呼ばれる確率過程となる。このとき、平衡状態において、通話中の呼の数が k である確率 $P(k)$ は

$$P(k) = \begin{cases} P(0) \frac{(\rho + \rho')^k}{k!} & 1 \leq k \leq c-g-1 \\ P(0)(\rho + \rho')^{c-g} \frac{(\rho')^{k-(c-g)}}{k!} & c-g \leq k \leq c \end{cases} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $\rho = \lambda/\mu$ 及び $\rho' = \lambda'/\mu$ であり、 $P(0)$ は規格化条件 $\sum_{k=0}^c P(k) = 1$ から決められる。

Poisson 過程として発生する呼の発生直前のセルの状態は平衡状態におけるセルの状態と同じ確率分布に従うので、新しい呼の呼損率 P_b とハンドオフ呼の呼損率 P_h は

$$P_b = \sum_{k=c-g}^c P(k) ; \quad P_h = P(c) \quad (2)$$

で与えられる。

3.2 セルラ網のモデル

次に、セルラ網全体を考える。セルラ網は n 個のセル $1 \sim n$ から成ると仮定する。セル i について、3.1 に示したトラヒック特性のパラメタはすべて添字 i を付けて表すことにする。さらに、ユーザがセル i に滞在する時間は平均が $1/\nu_i$ の指数分布に従うと仮定する。また、ユーザのセル間移動は確率的に考えて、セル i を出たユーザがセル j に移動する確率を γ_{ij} とし、サービス域の外に出る確率を γ_{ie} とする(すべての i について、 $\sum_{j=1}^n \gamma_{ij} + \gamma_{ie} = 1$)。このときセル i で発生するハンドオフ呼の発生率は、他のすべてのセルからハンドオフで出て行くもののうちセル i に入ってくるものを集めて

$$\lambda'_i = \sum_{j=1}^n \gamma_{ji} \left(\sum_{k=1}^c P_j(k) k \nu_j \right) \quad (3)$$

で与えられる。従って、添字付きの式(1)と式(3)は、パラメタ $c_i, g_i, \lambda_i, \mu_i, \nu_i$, 及び γ_{ij} が与えられたときの未知数 λ'_i ($1 \leq i \leq n$) に対する非線形連立方程式になっている。この解は固定点法と呼ばれる数値計算で求めることができる。

セル i で発生する新しい呼の3通りの運命の確率、すなわち、最初に呼損となる確率 $P_b^{(i)}$ 、通話途中で強制切断される確率 $P_f^{(i)}$ 、及び通話が最後まで完了する確率 $P_c^{(i)}$ を計算する。 $P_b^{(i)}$ と、セル i へのハンドオフ呼損の確率 $P_h^{(i)}$ は、添字付きの式(2)で与えられる。また、セル i において、ハンドオフの前に通話が終了する確率は

$$P_e^{(i)} = \frac{\mu_i}{\mu_i + \nu_i} \quad (4)$$

である。これらを用いて、セル i からセル j へのハンドオフが起り成功する確率は

$$P_{ij} = (1 - P_e^{(i)}) \gamma_{ij} (1 - P_h^{(j)}) \quad (5)$$

で与えられる。さらに、現在セル i にいる呼が網のどこかで通話完了する確率 π_i は、再生理論的考察により、方程式

$$\pi_i = P_c^{(i)} + \sum_{j=1}^n P_{ij} \pi_j \quad (6)$$

を満たすことがわかる。この線形連立方程式は数値計算で解く。その解から、最終的に

$$\begin{aligned} P_f^{(i)} &= (1 - P_b^{(i)})(1 - \pi_i) \\ P_c^{(i)} &= (1 - P_b^{(i)})\pi_i \end{aligned} \quad (7)$$

が得られる。

網内の任意の呼に対する呼損、強制終了、及び通話完了の確率を求めるには、 $P_b^{(i)}$ 、 $P_f^{(i)}$ 、及び $P_c^{(i)}$ をそれぞれ各セルにおける新しい呼の発生率で重みづけして平均をとればよい。

3.3 積形式解

3.1 に示された単一セルのモデルにおいてガードチャンネルを設定しない ($g = 0$) 場合には、新しい呼とハンドオフ呼の区別が無くなり、このとき式 (1) は待ち行列論の記号で $M/M/c/c$ と表される即時系に対する「打ち切られた Poisson 分布」になり、式 (2) で与えられる呼損率は有名な Erlang 呼損式となる。もし、セルラ網の各セルが独立にふるまうならば、セルラ網全体のシステムの状態の確率分布は式 (1) の形の式の積で与えられる。しかしながら、各セルが独立でない場合でも、いくつかの特殊な場合には、積形式解

$$P(\mathbf{k}) = \begin{cases} P(0) \prod_{i=1}^n (\rho_i^{k_i} / k_i!) & W\mathbf{k} \leq a \\ 0 & \text{その他の場合} \end{cases} \quad (8)$$

が成り立つことが示される。ここで、 $\mathbf{k} = (k_1, \dots, k_n)$ は各セルで通話中の呼の数を表すベクトル、 W は適当な行列、 a は各セルで使用可能なチャンネルの数に基づいて作られる適当なベクトルである。積形式解をもつ有線即時系通信網の例が本特集号の [5] に示されている。セルラ無線通信網では、動的チャンネル割り当ての理想的上界と考えられる最大パッキングや、CDMA 方式のセルラ網に対するセル間の干渉を考慮したモデルに適用されている [3]。

本章で示したようなモデルを基本として、非常に多くの変形・拡張モデルが研究されている。例えば、ハンドオフ呼を優先的に扱うために待ちを許すモデル、セルラ網においてトラヒックの多いセルを細分化してマイクロセルやさらにピコセルを構成する階層型モ

デル、音声とデータの統合通信のモデル等である [6]。データについては送信遅延時間が性能尺度となるが、これらのモデルの解析の方法は、基本的には上で示したものと同様であると言える。

4. 関連する確率モデル

本節では、セルラ移動体通信網のトラヒックモデルに関連のある確率モデルを 3 つ紹介する。

4.1 電話の掛け直し

人は、電話を掛けたときに話し中であれば少し時間をおいて掛け直す。従って、新しい呼と掛け直しの呼の発生を区別する再呼のある待ち行列モデルが伝統的な電話網の解析において多く提案されている [7]。

このモデルによれば、システムの状態は通話中のユーザ数と再呼準備中のユーザ数という 2 つの変数で表される。新しい呼は Poisson 過程に従って発生する。このとき、もしすべてのチャンネルが使用中であれば、その呼は再呼準備の状態となり、例えば指数分布に従う時間の後に再呼を試みるとしてモデル化される。

ハンドオフ呼のためのガードチャンネルを設定したセルラ網のモデルに、ユーザの再呼行動を取り入れるときには、呼損となる新しい呼の再呼とともに、ハンドオフ時に強制切断された呼が再呼をあきらめる確率等も導入すると、また種々のモデルができあがると思われる。

4.2 ユーザの移動

ユーザがサービス地域内を移動する過程をトラヒックモデルに直接取り入れることは難しい。そこで、単純に、セル内滞在時間は適当なパラメタの指数分布に従うと仮定して簡単な理論モデルを作るのであるが、求める性能尺度が呼損率のようなきわめて粗いものであれば、セル内滞在時間の分布の形はあまり影響しないであろう。また、セル内でのチャンネル保留時間は指数分布に従うと仮定できるとも言われている [8]。

セル内滞在時間を計算するための幾何学的確率モデルとして、半径 r の円内の任意の点から等確率で任意の方向に向かう半直線が円周と交わる点までの距離 X を考える。 X の分布の密度関数は

$$f_X(x) = \frac{2}{\pi r^2} \sqrt{r^2 - (x/2)^2} \quad 0 \leq x \leq 2r \quad (9)$$

で与えられ [4]、真直ぐに進むと仮定されるユーザの移動の速さを V とすれば、新しい呼の発生からハン

ドオフまでの時間 T_X の期待値は

$$E[T_X] = \frac{8r}{3\pi} E \left[\frac{1}{V} \right] \quad (10)$$

で与えられる。また、半径 r の円周上の任意の点から円内に入ったユーザが直線的に進んで再び円周と交わる点までの距離 Y の分布の密度関数は

$$f_Y(x) = \frac{x}{2r\sqrt{4r^2 - x^2}} \quad 0 \leq x \leq 2r \quad (11)$$

で与えられ、通話完了しないハンドオフ呼のセル内滞在時間 T_Y の期待値は

$$E[T_Y] = \frac{\pi r}{2E[V]} \quad (12)$$

となる [9]。これらの結果はセルの大きさとユーザの移動速度からトラヒックモデルで用いるパラメタの値を決めるのに役立つだろう。

4.3 確率的 Voronoi 図

幾何学的確率のもうひとつの応用として、サービス地域内における基地局やユーザの分布を、2次元平面上のランダムな点過程としてとらえ、その構造の確率的特性をセルラ網の特性に関連づけようとする研究がある [10]。最も簡単なモデルでは、基地局とユーザがそれぞれパラメタ λ_s と λ_u の 2次元 Poisson 分布に従って分布すると仮定する。基地局の分布が与えられると、その周りの「勢力範囲」を示す Voronoi 図を描くことができる。このとき、各基地局の勢力範囲の中に存在するユーザの数 N は、セルラ網の設計にとって重要なパラメタである。この確率変数 N の平均と分散は

$$E[N] = \frac{\lambda_u}{\lambda_s}, \quad \text{Var}[N] = \frac{\lambda_u}{\lambda_s} + 0.280 \left(\frac{\lambda_u}{\lambda_s} \right)^2 \quad (13)$$

であることが（結晶の成長過程のモデルの研究から）知られている。同じ設定において、有線網の設計に有用と思われる、勢力範囲内のすべてのユーザから基地局までの距離の総和 L の平均と分散も計算できる。このような結果をトラヒックモデルと融合させると、セルラ網のマクロな設計に使えるであろう。

5. おわりに

本稿では、セルラ移動体通信網の基本的なトラヒックモデルを示した。携帯電話会社がこのような理論モデルの解析を応用して通信網を設計しているのかどうかを、筆者は寡聞にして知らない。このような複雑

なシステムの性能評価に対する理論的研究の効用は、現実のシステムの詳細な複製にではなく（そのためなら、精巧なシミュレーションモデルを実測トラヒックデータで駆動すればよい）、抽出されたキーパラメタを用いて単純なモデルを作成し、それらのパラメタがシステムの動作に与える影響を明確に示して、システム設計の基礎的指針を与えることに求めるのが適当であろう。

参考文献

- [1] 齊藤忠夫・立川敬三 共編：“移動通信ハンドブック”，オーム社(1995)。
- [2] 藤本京平：“入門電波応用”，共立出版(1993)。
- [3] Everitt, D. E.: Traffic engineering of the radio interface for cellular mobile networks, *Proceedings of the IEEE*, Vol.82, No.9, pp.1371-1382, September 1994.
- [4] Hong, D., and Rappaport, S. S.: Traffic model and performance analysis for cellular mobile radio telephone systems with prioritized and nonprioritized handoff procedures, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.VT-35, No.3, pp.77-92, August 1986.
- [5] 滝根哲哉・村田正幸：“通信網における待ち行列—理論の応用と課題—”，オペレーションズ・リサーチ, Vol.43, No.5, 1998 (本号)
- [6] *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.15, No.8, Personal Communications - Services, Architecture, and Performance Issues, October 1997.
- [7] Falin, G. I., and Templeton, J. G. C. : *Retrial Queues*, Chapman & Hall, 1997.
- [8] Guérin, R. A.: Channel occupancy time distribution in a cellular radio system, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.VT-36, No.3, pp.89-99, August 1987.
- [9] Yeung, K. L., and Nanda, S.: Channel management in microcell/macrocell cellular radio systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.45, No.4, pp.601-612, November 1996.
- [10] Foss, S. G., and Zuyev, S. A.: On a Voronoi aggregative process related to a bivariate Poisson process, *Advances in Applied Probability*, Vol.28, No.4, pp.965-981, December 1996.