

自律分散無線マルチホップネットワークの研究とその展開

情報学研究科 通信情報システム専攻 通信システム工学講座 デジタル通信分野
教授 吉 田 進
准教授 村 田 英 一
助教 山 本 高 至

1. はじめに

最近の情報通信ネットワークのブロードバンド化には目を見張るものがある。とりわけ、空間を縦横無尽に駆け巡る電波によるワイヤレス技術の進展により、ネット接続が日常生活の隅々にまで浸透しつつある。“Ubiquitous”、“Embedded”などと言われる言葉には近距離ワイヤレス通信技術が暗黙のうちに仮定されている。また、WWRF (wireless world research forum、<http://www.wireless-world-research.org/> 参照) のビジョン “7 trillion wireless devices serving 7 billion people by 2017” (2017年までに7兆個の無線デバイスが70億人の生活を支援) から明らかなように、身の回りのあらゆる“もの”に無線通信機能が付与され、さまざまなマイクロな無線通信機能がついたセンサーや砂粒大の無線ICチップが生活空間に埋め込まれようとしており、日常生活の隅々にまでインターネットの恩恵が広まりつつある。このように多数の無線チップを相互に接続しようとする、集中制御方式では限界があり、自律分散制御型のネットワーク、すなわちいわゆるアドホック (ad hoc) なネットワーク (固定インフラを持たずに、その時々で臨機応変にネットを組む) に頼らざるを得ない。アドホック・ネットワークでは通常情報はマルチホップ接続を用いて伝送される。そして、今後無線LAN基地局間を無線で接続しカバーエリアを拡大するIEEE802.11sや固定インフラに必ずしも依存しない車車間通信に見られるように次世代無線通信ネットワークの重要な一翼を担うことが期待されている。

そこで、本稿では、自律分散ワイヤレス・アドホック・ネットワークを対象とし、当研究室で進めてきたアドホック・ネットワークの基本的な特性や、マルチホップ伝送のもつ本質的な特性の解明に向けた研究成果について紹介する。

まず第2章でマルチホップ伝送の(面的)周波数利用効率を解析し、真にマルチホップ伝送が有利な条件を明らかにする。第3章では、複数の送受信ペアが同時に通信ルートの選択を行おうとする場合に、ルート間の相互干渉により、より良いルートを求めて頻繁にルート変更が起こりえる現象をゲーム理論により解析し、達成可能なスループットを明らかにした。次に、その一つの展開例として、マルチホップ伝送の中継ノード周辺の通信端末が協調することにより、送信ダイバーシチ効果を実現し、無線伝送の高信頼化を狙った協力中継に関する研究について第4章で紹介する。この研究は、昨年10月に当研究室に加わった村田准教授が東工大ですすめていた研究を継続発展させつつあるものである。

2. マルチホップ無線ネットワークの周波数利用効率

無線中継通信であるマルチホップ伝送を用いた無線通信システムの容量を評価した。無線中継通信としては、既に衛星中継や携帯電話システムの中継増幅器(ブースタ)がある。衛星中継と比べると、マルチホップ伝送は複数回の中継が前提とされ、経路選択の重要性が増す。また、ブースタは受信し

た信号全てを増幅中継するため基本的に電波干渉を増加させるのに対し、マルチホップ伝送は所望信号のみを転送するため効率の向上が期待される。

2.1 マルチホップ伝送の周波数利用効率

マルチホップ伝送の最大の目的はサービスエリアの拡大である。直接通信できない無線局間において、中継局を用いたマルチホップ伝送を行えばその間の通信が可能になることは、直感的にも分かりやすい。しかしながら、マルチホップ伝送で実現可能なサービス品質は、直接通信の場合と必ずしも等しいとは言えない。例えば、直接通信であれば送受信局間で常に伝送が可能であるのに対し、マルチホップ伝送時は中継局の受信と送信タイミングを分ける必要があり、単純にはスループットは半分になってしまう。逆に直接通信であってもレート制御（例えば伝送速度を下げる）を行えば、遠方でも通信が行える可能性がある。すなわち、マルチホップ伝送とレート制御はスループットを下げることで通信距離を拡大するという点で同じ技術と言えよう。従って同じ通信品質を考えた場合に、マルチホップ伝送とレート制御のどちらがより広いサービスエリアを実現できるかという問題の答えは、直感的に分かるほど明白ではない。

情報理論におけるシャノン容量を用いてこの問題を簡易に考えてみる。シャノン容量とは、通信チャネルの帯域幅 B とSNR（信号対雑音電力比）によって決まる伝送容量の最大値であり、 $B \log_2(1+SNR)$ によって与えられる。次に、2局間を n 等分する位置にある中継局を用いる n ホップ伝送を考える。送信タイミングを n 分割する必要があるため、中継局あたりの等価的な帯域幅は B/n となるが、自由空間では距離の2乗に比例して増大する伝搬損を考えれば、それぞれの送受信局間のSNRはエンドツーエンドのSNRより n^2 だけ大きい。この場合、容量は $(B/n) \log_2(1+n^2SNR)$ となる。図1のように直接通信とマルチホップ伝送の容量を比較すると、SNRが高い場合は送信タイミングを分けることによるロスが大きく、直接通信の方が高い容量を得られるが、SNRが低い場合は送受信局間の距離が短くなることによるゲインが大きく、マルチホップ伝送を用いる必要性が高まる。

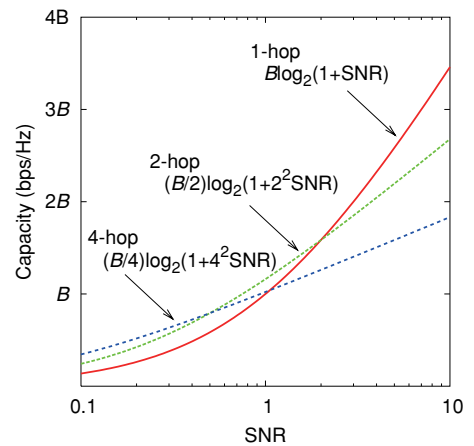


図1：マルチホップ伝送の周波数利用効率

2.2 干渉存在下のマルチホップ無線ネットワークの面的周波数利用効率

携帯電話システムのように無線通信の面展開にあたっては、周波数帯域を空間的に離れた位置で再利用することで周波数帯域の有効利用を図る。携帯電話システムがセルラシステムと呼ばれる所以である。一般により高速の無線通信を行うためには、受信SNRを上げる必要がある。再利用する距離を離せば干渉の影響が減り、より高効率の伝送方式が使えるようになる一方、面的にカバーするために多くのチャンネルが必要となる。逆に近い距離で周波数帯域を再利用すれば必要なチャンネル数は少なくなるものの、各々の通信については干渉を強く受けるため、誤り率を一定以下に抑えるためには低効率の伝送方式を用いる必要がある。そこで、従来知られているこのトレードオフの関係が、マルチホップ伝送の導入によってどのように変化するかを調べた[1]。

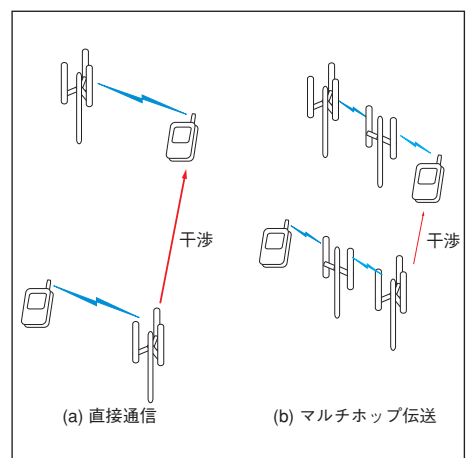


図2：面的周波数利用効率の向上

直感的な理解としては図2のように、2ホップ伝送を行った場合には通信距離が直接通信時の半分になるため、再利用距離を半分にして密に同時送信を行っても各通信の受信品質は下がらない。送信タイミングを2分割する必要があるため、エンドツーエンドではスループットは半分になるが、再利用距離を半分にするため同時通信密度はおよそ $2^2=4$ 倍となる。スループットと密度の積で与えられる面的周波数利用効率という基準で言えば $1/2 \times 4 = 2$ 倍になっており、マルチホップ伝送の導入でシステム容量を向上しうることが分かる。

3. ゲーム理論による分散適応経路制御の解析

無線通信システムの規模によっては、携帯電話システムのような集中制御ではなく、分散制御によって実現した方が効率がよい。例えば、今日普及している無線LANでのアクセス制御としては、分散制御であるCSMA（搬送波検知多元接続）が用いられている。今後無線デバイスの密度がより一層増加することが予想され、各無線局が自律分散的に周波数資源を有効に利用できる制御方式が望まれる。

各無線局が高いスループットを得られるよう、通信経路を分散制御によって適応的に決定する状況を評価した。この場合、最適な通信経路や伝送速度は他の無線局の通信方法に左右される。これは制御決定主体が複数存在することが原因であり、複数の意志決定主体間の競争を扱うゲーム理論を導入することで解析を行った。ゲーム理論では各プレイヤーが自分の選択できる戦略のうち、自らの利得が最大になる戦略を選ぶ状況の解を与える。この場合、各プレイヤーが自己の利得の最大化を追求する限り、必ずしも全体の利得の最大値とは一致しない局所最適点（いわゆるナッシュ均衡点）に落ち着く可能性がある。具体的には無線局をプレイヤー、選択しうる経路を戦略、各経路で得られるスループットを利得とした場合について、このナッシュ均衡点を用いた評価を試みた。

この評価で明らかとなったことは二つある。一つ目は、図3のように分散適応経路制御が収束しない可能性である。どのような条件でも少なくとも1局が別の経路に変更した方が高いスループットを得られる状況があり、経路変更が繰り返し起こる。このような経路変更の繰り返しは制御オーバーヘッドの増大に繋がりうる。二つ目は、分散適応経路制御によって得られるスループットは、送信電力が低ければ集中制御の場合に近いスループットを得られることである。送信電力が低ければ互いに与える影響が小さく、自らのスループットのみの上昇により、全体最適に近づく[2]。

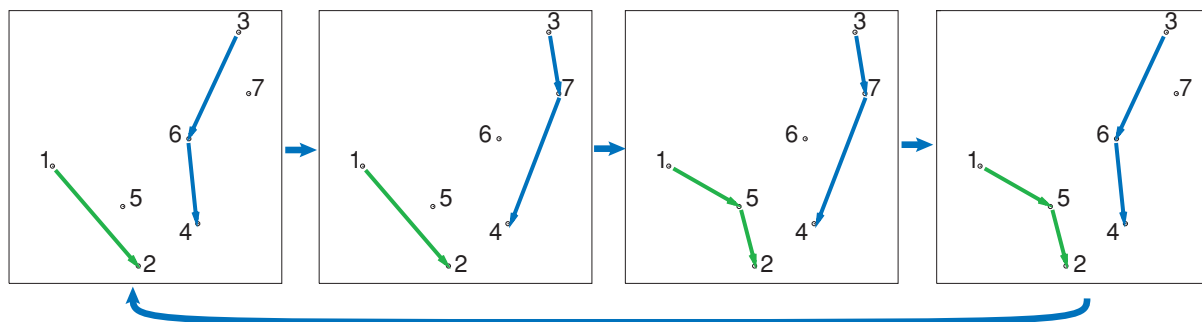


図3：適応経路制御が繰り返し起こる例

4. 時空符号化協力マルチホップ伝送方式の研究

4.1 電波を広げさせない

マルチホップ伝送の利点を簡単な例で示す。2点間の通信について、直接に電波を飛ばす直接通信と、その通信区間を等間隔に10中継（ホップ）させるマルチホップ伝送を比較する。障害物等のない自由空間においては、受信信号電力は距離の2乗に反比例する。等間隔の10ホップ通信では各ホップ

の距離が10分の1になっているため、各ホップにおいて必要な送信電力は100分の1で済み、10ホップ分の合計送信電力は直接通信の10分の1である。このようにマルチホップ伝送は総送信電力の削減効果があるが、これは見方を変えると「電波を広がらせない」効果となっている。

送信点から広がる電波の強さを図4に示す。図4の左は直接通信の場合であり、中央の黒い部分に発信局、矢印の先端に目的局がある。図4の右は10ホップ通信の場合であり、10個の小さな黒い点の部分に発信局と中継局がある。直接通信の場合は電波は同心円状に広がっている。一方10ホップ伝送では、電波の強い部分が目的局の方向、つまり通信方向に延びている。このことから、マルチホップ伝送では電波の空間的な広がりが抑えられることが分かる。似た効果を持つものとして従来から指向性アンテナがあるが、扇形に電波が広がってしまっていた。一方、マルチホップ伝送は通信点間を結ぶ線分付近に電波を集中させる効果がある。

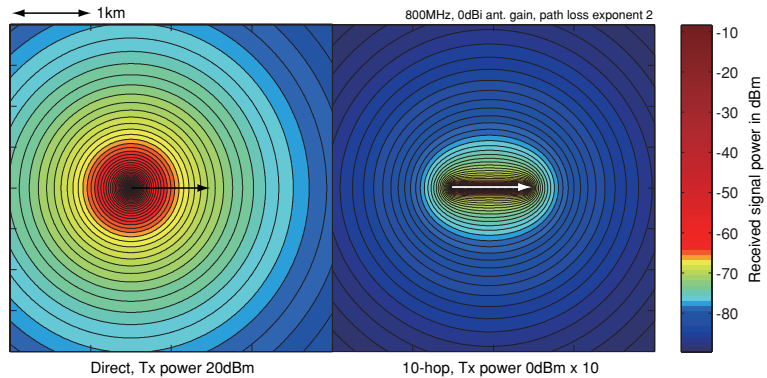


図4：直接通信とマルチホップ伝送での電波の広がり方の違い

4.2 特性劣化を克服する

しかしながら、マルチホップ伝送は中継を繰り返す結果としてEnd-to-Endの伝送特性が劣化してしまう。この劣化を克服するために、各ホップにおいて複数の中継局を利用する協力中継が考えられている。ここでは現在試作を進めている方式について説明する。ある2台の無線局A,Bが無線局Cに向けて協力して送信する手法として、AとBが同時に同じ周波数で同じ情報を送信する送信ダイバーシチを利用する。無線通信路は不安定であるため、このように2系統から信号が得られると大幅に安定した通信が可能となる。この際に、全く同じ波形をAとBから送信すると受信側において打ち消しあってしまう場合が生じ、伝送特性の改善効果は限定的となる。このため、空間的に異なった場所からの同時送信において、それぞれの信号に異なる符号化を施す。この技術は時空符号化と呼ばれている。これによって、2信号の打ち消しあいが起こらなくなりダイバーシチ効果と呼ばれる特性改善効果が得られる。

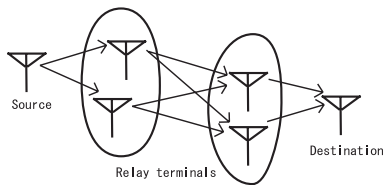


図5：協力マルチホップ伝送方式（協力台数N=2, 3ホップ）

さらに、図5に示すような協力伝送を繰り返す協力マルチホップ伝送では、ホップを繰り返してもEnd-to-Endの伝送特性がほとんど劣化しない性質が得られる[3,4]。伝送特性の一例を図6に示す。全ての受信機のSN比を等しく設定しており、図の横軸がそのSN比である。これは例えば、各ホップを等距離とし、かつ各ホップ毎の協力送信局合計の送信電力をどのホップでも等しくした場合に相当する。

この条件に当てはめて解釈すると、2ホップよりも4ホップの方が総送信電力が2倍であり、End-to-Endの距離も2倍となっている。

図6を見ると、協力送信台数Nが2の場合でも4の場合で

さらに、図5に示すような協力伝送を繰り返す協力マルチホップ伝送では、ホップを繰り返してもEnd-to-Endの伝送特性がほとんど劣化しない性質が得られる[3,4]。伝送特性の一例を図6に示す。全ての受信機のSN比を等しく設定しており、図の横軸がそのSN比である。これは例えば、各ホップを等距離とし、かつ各ホップ毎の協力送信局合計の送信電力をどのホップでも等しくした場合に相当する。この条件に当てはめて解釈すると、2ホップよりも4ホップの方が総送信電力が2倍であり、End-to-Endの距離も2倍となっている。

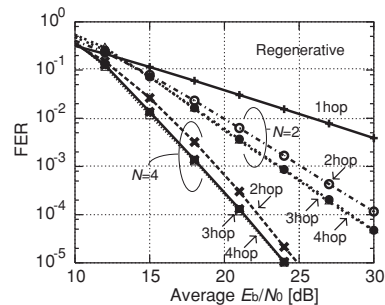


図6：協力マルチホップ伝送のEnd-to-Endフレームエラーレート (FER) 特性（横軸はSN比に相当する値）

も、2ホップよりも3ホップや4ホップの方が優れたフレームエラーレート(FER)特性を示している。この不思議な特性の原因は、各ホップの伝送特性が同一ではないことにある。途中の中継では送信2局対受信2局の伝送による4次のダイバーシチ効果が得られ伝送特性が良好であるが、最初と最後のホップの伝送特性は2次のダイバーシチ効果しか得られない。このため、End-to-Endの伝送特性は最初と最後のホップによって支配され、途中のホップにおける特性劣化はほぼ無視できる。このため、ホップ数を増しても伝送特性がほとんど劣化しない性質が得られる。この結果は、ホップ数に比例した総送信電力によって伝送特性を保ちつつ伝送距離を伸ばすことができることを意味しており、従来は基本的に距離の2乗以上の送信電力が必要であった無線伝送が、1乗(比例)で可能であることを示している。

研究室ではこのような協力マルチホップ伝送の基本システムの試作を行っており、屋外でのフィールドトライアルに向けた作業を進めている。また、模擬伝搬路での特性確認や中継方式の改善、伝送特性の明確化等の点から研究を進めている。図7に試作中の実験用無線機を示す。



図7：試作中の協力マルチホップ伝送実験装置(写真は2台のみ)

5. おわりに

あらかじめ計画的・組織的に設置された通信インフラに加えて、無線により臨機応変に通信インフラを構築可能な無線アドホック(マルチホップ)ネットワークが今後社会のさまざまなところで重要な役割を担うことが期待されている。特に、無線端末が遍在するユビキタスネットワークの時代を見据え、近くにいる無線端末同士が連携し、場合によっては協力し合う(協力)マルチホップ伝送の特性解明に向けた研究を進めており、その成果の一端を紹介した。今後は、(協力)マルチホップ伝送のフィールドトライアルを通じてその更なる可能性を探ると共に、アクセス系に依存しない真に固定網と移動網が融合したネットワークを想定し、高信頼度かつセキュアなワイヤレス情報伝送に向けて研究を継続していく予定である。

(参考文献)

- [1] Koji Yamamoto and Susumu Yoshida, "Tradeoff between area spectral efficiency and end-to-end throughput in rate-adaptive multihop radio networks," IEICE Trans. Commun., vol.E88-B, no.9, pp.3532 - 3540, Sept. 2005.
- [2] Koji Yamamoto and Susumu Yoshida, "Game-theoretic approach to capacity and stability evaluations of decentralized adaptive route selections in wireless ad hoc networks," IEICE Trans. Commun., vol.E88-B, no.3, pp.1009 - 1016, March 2005.
- [3] 宮野 剛, 村田英一, 荒木純道, "時空符号化協力マルチホップ通信における再送同期制御方式," 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J89-B, no.6, pp.920 - 925, June 2006.
- [4] 風澤柳太, 村田英一, 荒木純道, "送信ダイバーシチを用いた協力マルチホップ無線ネットワークの伝送特性解析," 2006年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, B-5-121, p. 481, Sep. 2006.