

多数の基地局・中継局連携による無線 LAN 技術の課題

猿渡 俊介[†] 渡辺 尚[†]

[†] 静岡大学 〒432-8011 静岡県浜松市中区城北 3-5-1

E-mail: †{saru,watanabe}@inf.shizuoka.ac.jp

あらまし 電波は有限の資源であるため、電波資源を極限まで有効利用することは情報通信のみならず、情報通信が関わる多くの分野の発展にとって重要である。本稿では、電波の極限利用に向けた多数の基地局・中継局連携による無線 LAN 技術の課題と、筆者らが現在取り組んでいるトラフィック量に応じた重畳符号化 MAC プロトコル、無線全二重を用いたマルチホップ通信、レートレス符号化を用いた環境発電型ネットワークについて紹介する。

キーワード 電波資源極限利用、無線 LAN、レートレス符号化、干渉除去、環境発電型ネットワーク

Towards Wireless Local Area Networks using Multiple Access Points and Relay Stations

Shunsuke SARUWATARI[†] and Takashi WATANABE[†]

[†] Shizuoka University 3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8011 Japan

E-mail: †{saru,watanabe}@inf.shizuoka.ac.jp

Abstract The maximal and effective use of limited radio resources is important to develop not only information-communication technology (ICT) but also ICT's broad application areas. To this end, this paper discusses wireless local area networks using multiple access points and relay stations. This paper also introduces our approaches: a traffic-aware superposition coding MAC protocol, a wireless full-duplex and multi-hop network, and a rateless energy harvesting wireless network.

Key words Radio Resources, Wireless LAN, Rateless Coding, Interference Cancellation, Energy Harvesting

1. はじめに

実空間に存在するありとあらゆるものをプログラマブルにしたい。筆者がそのような考えて研究を始めてから 10 年が経った。ユビキタスコンピューティング [1]~[3]、センサネットワーク [4]~[7] の研究を進める中で筆者が強く感じたのは、コンピュータネットワークの最後の 1 ホップの無線化が最も難しいということである。身近な例としてスマートフォンを考えてみても、携帯電話の技術によっていつでもどこでもネットワークにつながってはいるが、有線と比べると依然として遅い。

最後の 1 ホップの無線化が困難なのは通信だけではない。有線と同等の速度の無線通信が実現できたとしても、エネルギーの問題が残る。現在の無線通信における省電力化は基本的には送信データサイズや送信レートを下げることによって実現されている。通信が高周波・大容量になると現在の省電力化技術だけではどうにもならず、最終的には電力は有線に頼らざるを得ない。電力の問題は無線センサネットワークの応用範囲を狭める要因の 1 つである。最後の 1 ホップの無線化を実現するためには環境発電技術や無線電力伝送などのエネルギー供給を無線

化する技術の発達も不可欠である。

今後の無線通信の超高速化・大容量化や無線電力伝送を想定すると、電波資源を極限まで利用するための技術開発が必要となる。現在の電波は一部を除いて国の機関によって固定的に割り当てられている。しかしながら、電波の割り当ては情報通信技術が未発達で 20 世紀初頭に干渉を避けるという目的で始まったものであり、現在の最先端の情報通信技術に鑑みると無駄の多い使われ方をしている。社会システムは簡単には変えられないものの、いずれは有限である電波資源を技術的根拠に基づいて極限利用できるように電波の割り当て施策を変えなければ、情報通信のみならず、情報通信が関わる全ての分野の発達の大きな足かせになると予想される。

このような観点から、筆者らは電波資源の極限利用を想定した無線 LAN 技術として、多数の基地局・中継局連携による無線 LAN の研究を進めている [8]~[10]。図 1 に多数の基地局・中継局連携による無線 LAN の全体像を示す。図 1 では、1 つの空間に存在する多数の基地局と中継局が連携しながら無線 LAN システムを構築している。基地局は有線でネットワーク接続されている。中継局は有線で電力供給されているものの、

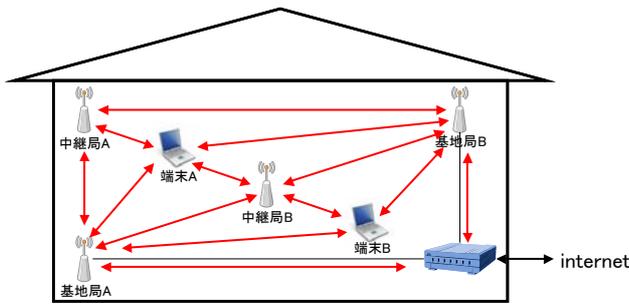


図 1 多数の基地局・中継局連携による無線 LAN

無線で基地局と端末との通信を中継する。

本稿の構成は以下の通りである。2 節では、電波資源の極限利用に向けた無線 LAN における課題について述べる。3 節では、電波資源の極限利用に関係する関連技術について述べる。4 節では、無線資源の極限利用に向けて筆者らが進めている研究について述べる。最後に 5 節でまとめとする。

2. 課題

本節では、無線 LAN において、電波資源を極限利用することを考えた場合、どのように電波資源を有効利用できていると判断すればよいかを考える。現在のところ、電波資源を有効利用できているということを明確に評価する指標はない。現在の無線通信システムでは、無線通信の効率としてあるシステムにおいてエリア辺りの許容ユーザ数とシステムの総スループットで評価するのが一般的である。しかしながら、電波の占有量の観点で電波資源を捉えた場合、単純にエリア辺りの許容ユーザ数とシステムの総スループットだけでは電波資源を有効利用できているかどうかを議論するのは難しい。

具体的なケーススタディとして、「ある特定のエリア内に基地局が 1 つだった場合と 2 つだった場合のどちらが電波資源を有効活用しているだろうか?」という問いを考える。以下の議論では、電波の減衰や通信レートは理想的な場合を想定していることに注意されたい。ここでは、図 2 のような $500\text{ [m]} \times 500\text{ [m]}$ のフィールドを考える。フィールド上の位置は (x, y) で表され、左下を原点 $(0, 0)$ 、右上が $(500, 500)$ となる。図 2 では、フィールドにおける環境ノイズは便宜的に -100 [dBm] であるとする。

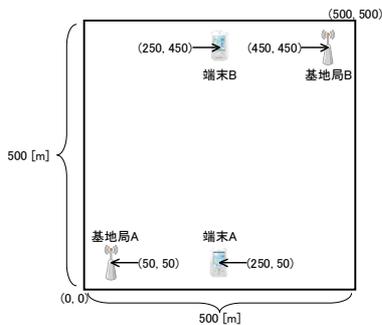


図 2 $500\text{ [m]} \times 500\text{ [m]}$ のフィールド

2.1 一度に 1 つの基地局が送信する場合

フィールドにおいて一度に 1 つの基地局が送信する場合、基地局が 1 つの場合と基地局が 2 つの場合では基地局が 2 つの場合の方が電波の利用効率が高い。まず、 $(50, 50)$ の地点に基地局である基地局 A を 1 つ設置したとする。図 3 に $(50, 50)$ にある基地局 A が送信電力 20 [dBm] でフレームを送信した際のフィールドの各点における受信電力を示す。ここで、 $(250, 50)$ の地点に端末 A が存在したとする。端末 A での受信電力は、約 -82 [dBm] となる。ノイズの電力が -100 [dBm] であるため、端末 A での SNR は約 18 [dB] となり、通信帯域幅を 20 [MHz] とするとシャノン限界よりスループットは約 120 [Mbps] となる。

次に、 $(250, 450)$ の位置に存在する端末 B が通信する場合を考える。基地局が基地局 A の 1 つしか存在しなかった場合、基地局 A が送信電力 20 [dBm] でフレームを送信すると端末 B での受信電力は約 -93 [dBm] となる。ノイズの電力が -100 [dBm] であるため、端末 B での SNR は約 7 [dB] となり、スループットは約 52 [Mbps] となる。

今度は $(50, 50)$ の地点に設置された基地局 A と、 $(450, 450)$ の地点に設置された基地局 B との 2 つが存在した場合を考える。端末 B は基地局 A よりも基地局 B の方が近いため、基地局 B と通信したとすると、基地局 A と端末 A との通信と同様にスループットは約 120 [Mbps] となる。基地局として基地局 A の 1 つのみが存在しなかった場合には端末 B へのスループットが約 52 [Mbps] であったのに対し、基地局が 2 つ存在した場合には端末 B に近いほうの基地局との通信が可能であるため、約 120 [Mbps] となった。端末が常に最も近い基地局を介してネットワークに接続していると仮定すると、基地局の数が増えれば増えるほど電波資源の利用効率は高くなると考えられる。

2.2 一度に 2 つの基地局が送信する場合

次に、2 つの基地局が協調して同時に送信可能である場合を考える。まず、基地局 A がフレームを送信した場合、フィールドの中で基地局 A より最も遠い点である $(500, 500)$ の場所での受信電力は -97 [dBm] となる。ノイズの電力が -100 [dBm] であるため、SNR は 3 [dB] となる。現在の無線 LAN で用いられている IEEE 802.11 [11] では、キャリアセンスするため、他の端末が通信中であると判断した場合には通信を抑制する。すなわち、IEEE 802.11 を用いた場合には基地局 A が送信し

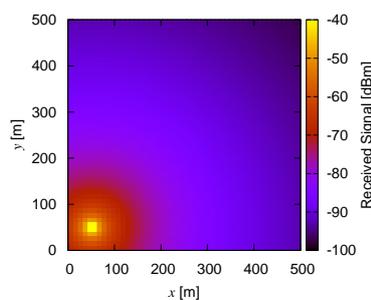


図 3 1 つの基地局が電波を送信した場合の受信電力マップ

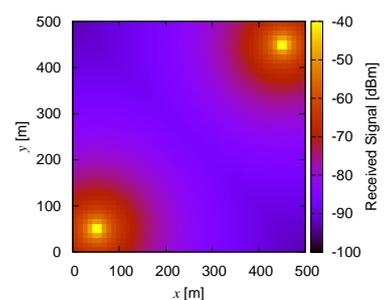


図 4 2 つの基地局が同時送信した場合の受信電力マップ

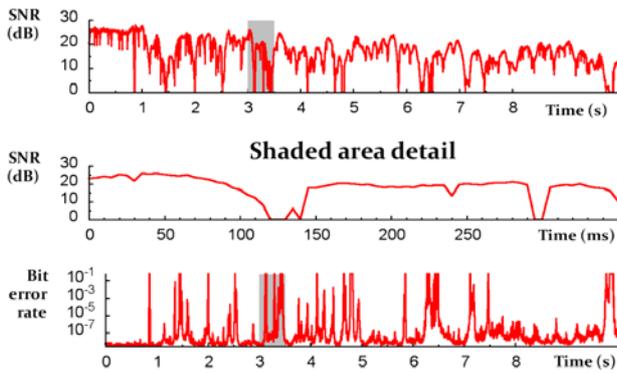


図 5 時間によるチャネルの変動 (出典 : [12] M. Vutukuru, et al. Cross-layer wireless bit rate adaptation. *ACM SIGCOMM'09*, pp. 3-14, October 2009.)

ている間には他の基地局や端末は送信できない。

しかしながら、キャリアセンスを無視すると異なる結果が得られる。図 4 に基地局 A と基地局 B の 2 つが同時に送信した場合の受信電力を示す。端末 A における基地局 A からの電波の受信電力は、先ほど述べたように、約 -82 [dBm]、端末 A における基地局 B からの電波の受信電力は約 -93 [dBm] となる。端末 B における基地局 B からの電波の受信電力は約 -82 [dBm]、端末 B における基地局 A からの電波の受信電力は約 -93 [dBm] となる。基地局 A から端末 A への送信、基地局 B から端末 B への送信が同時にされたとすると、基地局 A から端末 A への送信の SNR は基地局 B の送信が干渉波になるので 9 [dB]、基地局 B から端末 B への送信の SNR は基地局 A の送信が干渉波になるので 9 [dB] となる。SNR が 9 [dBm] の時には送信レートは約 63 [Mbps] になる。すなわち、システム全体で見た場合の総スループットは、基地局 A から端末 A へのスループットと基地局 B から端末 B へのスループットを合計したものになるため、約 126 [Mbps] となる。基地局 A から端末 A 宛での通信のみの場合の約 120 [Mbps] よりも大きな総スループットが実現できている。

では、2 つの基地局が同土に送信できるという環境において、改めて本節での冒頭の問い「基地局が 1 つだった場合と 2 つだった場合のどちらが電波資源を有効活用しているだろうか?」を考える。結論から述べると、筆者自身はまだ答えを持ち合わせていない。図 3 と図 4 を比較した場合、電波の占有量は図 4 の基地局が 2 つの方が図 3 の基地局が 1 つの場合の 2 倍である。電波の占有量は基地局 2 つの方が 2 倍も多いにも関わらず、システム全体での総スループットは基地局 1 つの場合が約 120 [Mbps]、基地局 2 つの場合が約 126 [Mbps] と 2 倍ほどの違いはない。電波の占有量に対して総スループットの改善が小さいので電波資源の利用効率は悪いという見方もできる。一方で、少しでもシステム全体での効率が上がるのであれば余っている電波資源を積極的に使うことこそ電波資源の極限利用であるという見方もできる。

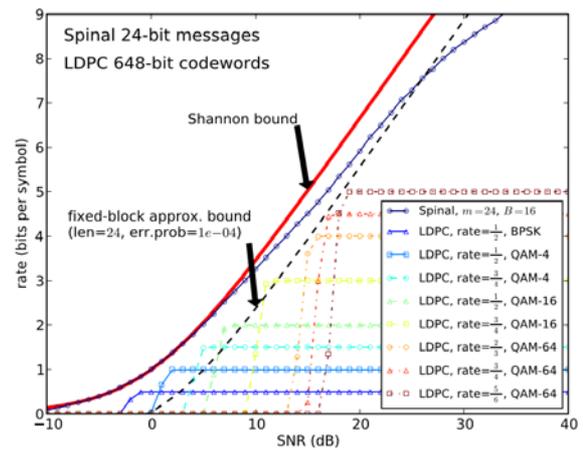


図 6 Spinal Code の性能 (出典 : [13] J. Perry, et al. Rateless spinal codes. *ACM HotNets-X*, pp. 1-6, November 2011.)

3. 関連研究

3.1 レートレス符号化

2 節の議論では、シャノン限界を前提に議論していた。しかしながら、これまでの無線通信では、シャノン限界に近づくのは困難であるという認識であった。例えば、チャネルは時間によって変動するため、送信レート制御では常に最適な送信レートでフレームを送信することが困難である [12]。図 5 に文献 [12] に記載されている時間軸に対するチャネル変動を引用する。図 5 から分かるように、 50 [ms] の間に SNR が 10 [dB] 以上変動することも発生しうる。

このような問題に対して、文献 [13] ~ [17] では、レートレス符号化を無線 LAN に適用することで、チャネルが変動したとしても常に最適な送信レートで送り続けることに成功している。特に Spinal Code [14] では、ハッシュ関数を用いて符号を生成した上で、受信シンボルをパブルデコーダで復調することでシャノン限界に近い性能を実現している。図 6 に文献 [13] に記載されている Spinal Code における SNR に対する送信レートを引用する。図 6 から分かるように、既存の LDPC を用いた手法では SNR に応じた最適な変調方式が異なる。例えば、SNR が 0 [dB] の時には BPSK が最も良く、SNR が 20 [dB] の時には QAM-64 が最も良い。それに対して Spinal Code では、全ての SNR において LDPC を上回っているだけでなく、シャノン限界に迫る性能を發揮している。

レートレス符号化の登場は電波資源の極限利用を考えた場合に大きい。他の基地局や端末の通信によってチャネルが変動したとしても、通信容量に余力がある場合には余すことなくチャネル容量を使い切ることができるからである。文献 [17] ではレートレス符号化と後述する干渉除去を組み合わせる試みもなされている。また、文献 [13] ~ [17] では既に GNU Radio [18] と USRP [19] で実装された上での評価もされている。今後はレートレス符号化を前提に無線 LAN 技術が設計されると考えられている。

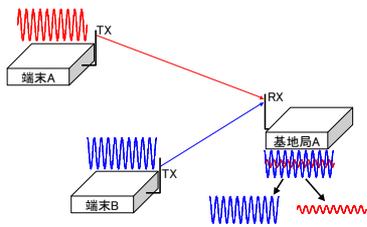


図 7 逐次干渉除去

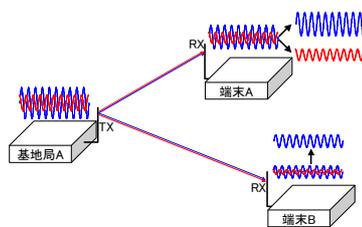


図 8 重畳符号化

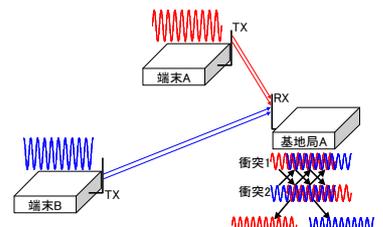


図 9 ZigZag Decoding

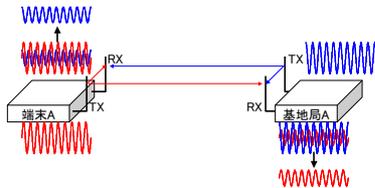


図 10 無線全二重通信

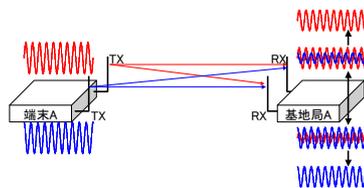


図 11 MIMO



(a) 双方向全二重通信 (b) 中継全二重通信

図 12 双方向全二重通信と中継全二重通信

3.2 干渉除去 (Interference Cancellation)

2.2 節の議論では、自分の通信と関係のない通信からの干渉をノイズとして扱っていた。しかしながら、干渉波に含まれているフレームの中身を何らかの方法で知ることができれば、干渉を除去することが可能となる。干渉除去を利用した技術としては、逐次干渉除去 (SIC: successive interference cancellation), 重畳符号化 (SPC: superposition coding), 無線全二重通信, MIMO (multiple-input and multiple-output), ZigZag Coding などが挙げられる。

図 7 に逐次干渉除去 [17], [20] ~ [22] の例を示す。図 7 では、端末 A と端末 B が基地局 A に対して同時にフレームを送信して 2 つのフレームが重なったものを基地局 A が受信している。端末 B の方が端末 A よりも基地局 A に近かった場合、基地局 A はキャプチャ効果 [23] によって端末 B からのフレームのみを最初に復調する。復調した端末 B からのフレームを用いて端末 B からの信号を復元し、受信信号から端末 B の信号を除去すると、端末 A からの信号のみが残るため、端末 A からのフレームも復調できる。端末 A と基地局 A の伝播ロス、端末 B と基地局 A の伝播ロスの 2 つの伝播ロスの差が大きければ大きいほど逐次干渉除去によって得られる利得は大きくなる。

逐次干渉除去と逆の動作をするのが重畳符号化 [17], [21], [24] ~ [28] である。図 8 に、重畳符号化の例を示す。基地局 A は、端末 A 宛てのフレームと端末 B 宛てのフレームを重ね合わせて 1 つの信号にして 2 つの端末に同時に送信する。基地局 A に近い場所に存在する端末 A は、前述した逐次干渉除去を用いて 2 つのフレームを復調する。端末 B は端末 A に比べて基地局 A よりも遠い場所に存在するため、端末 A が受信したよりも小さい電力で重畳フレームを受信する。端末 B が受信した重畳フレームでは、端末 A 宛ての信号がノイズに埋もれて復調できなくなるため、端末 B 宛てのフレームのみが復調できる。逐次干渉除去と同様に端末 A と基地局 A の伝播ロス、端末 B と基地局 A の伝播ロスの 2 つの伝播ロスの差が大きければ

大きいほど重畳符号化によって得られる利得は大きくなる。

文献 [17] では、逐次干渉除去・重畳符号化とレートレス符号化を組み合わせた試みがなされている。また、GNU Radio/USRP を用いた実装による検証もされ始めている [20], [22], [24], [26]。これらの研究では、逐次干渉除去や重畳符号化を用いない場合に比べて、約 1.3 倍程度の総スループット向上が見られている。

逐次干渉除去と重畳符号化は共に 2 つの通信路の伝播ロス差が大きい場合に利得が大きくなる手法であった。それに対して、2 つの通信路の伝播ロス差が小さい環境で威力を発揮するのが ZigZag Decoding [29] である。図 9 に、ZigZag Decoding の動作を示す。図 9 では、端末 A と端末 B がそれぞれ異なるフレームを基地局 A に対して送ろうとしている。基地局 A では、異なるタイミングで端末 A と端末 B の送信フレームが衝突した衝突フレームを 2 つ受信している。ZigZag Decoding では、2 つの衝突フレームを用いて衝突タイミングのずれを利用してジグザグの動きで干渉除去することで端末 A と端末 B のそれぞれの送信フレームを復元する。

ここまで紹介した干渉除去はアンテナ 1 つを用いたテクニックであった。それに対して無線全二重通信 [30] ~ [35] では、複数のアンテナと干渉除去を組み合わせることで、1 つの周波数帯で同時に送受信することを可能としている。図 10 に無線全二重通信の動作を示す。端末 A と基地局 A が同時にフレームを送信した場合、自身が送信する信号を自分で受け取ってしまうため、端末 A が受信する信号は基地局 A から送信された信号と端末 A が送信した信号が重なったものとなる。無線全二重通信では、端末 A は自身が送信した信号を知っているため、アナログ回路による干渉除去とデジタル回路による干渉除去の 2 つを組み合わせることで基地局 A からの信号を復調する。

MIMO [36] ~ [40] も干渉除去を利用した技術の 1 つであると捉えることができる。図 11 に MIMO の動作を示す。図 11 では、端末 A がアンテナ 2 本を用いて 2 つのフレームを送信し、基地局 A がアンテナ 2 本を用いて端末 A からのフレームを受信している。基地局 A は、それぞれのアンテナで受信した干渉

フレームがそれぞれ異なるチャンネルを介して届いたことを利用して、2つのフレームを復調する。MIMOと無線全二重通信を組み合わせた方式[38]、超多数のアンテナを用いた方式[37]などの研究が進められている。

3.3 環境発電と無線電力伝送

冒頭でも述べたように、真の意味で最後の1ホップを無線化するためには電力の問題は避けて通ることができない。筆者らは、環境発電技術や無線電力伝送技術が電力の無線化の鍵であると考えている。

環境発電技術としては、太陽電池[41]、[42]、圧電、振動[43]、[44]、熱、音響雑音、電波[45]と様々な技術が存在する。環境発電技術の発電量は、太陽電池、圧電、振動、熱、音響雑音それぞれ1[cm³]あたり15[mJ/s]、0.33[mJ/s]、0.116[mJ/s]、0.04[mJ/s]、0.00096[mJ/s]である[41]。無線電力伝送技術としては古くから電波を用いた電力伝送が研究されており[46]、[47]、既にRF-IDなどに応用されている。近年では、電磁界の共鳴現象を利用した電磁界共鳴方式が登場し[48]、マルチホップで電力伝送する方式[49]も検討されている。

これらの環境発電技術や無線電力伝送技術の中でも、筆者らは電波に着目している。例えば、電波を用いて環境発電をしたとすると、2.2節で挙げた例のようにスループットの向上には大きく貢献しなくても、電力源の観点で電波資源を有効活用できていると見ることもできる。さらに、電波で電力伝送することを前提とすれば、将来的に無線LANシステムと無線電力伝送システムとを融合できる可能性もあり、無線LANを展開していけばいつでもどこでもネットワーク接続と電力供給が可能な環境ができると考えられる。

4. アプローチ

2節で述べたように、筆者らは、現段階では電波資源を有効利用できているかどうかをどのような指標で評価するか模索段階である。特に、電波資源の極限利用では、3節に示したような複数の階層の技術が密接に絡み合いながら無線通信システムを構築するため、これまでの各層に分断したモデルでのシミュレーション評価では限界があると考えている。このような観点から、筆者らは、3節に示した各技術を組み合わせた無線通信システムを構築した場合に、どのような課題があるかをソフトウェア無線技術による実証主体で検討しようとして試みている。

4.1 トラフィック量に応じた重畳符号化MAC

これまで、3.2節に示した重畳符号化を用いてスループット性能を改善する研究がなされてきた[17]、[21]、[25]、[27]、[28]。しかしながら、重畳符号化はトラフィックによっては効率が悪くなる場合が存在するものの、既存の研究[17]、[21]、[25]、[27]では、バッファ内に常に最大量のフレームが存在する理想的なトラフィックのみを前提としている。

このような観点から、筆者らは、バッファ内のデータ量に応じて重畳符号化を制御する無線通信メディアアクセス制御プロトコルTSPC-MAC(Traffic-aware Superposition Coding Medium Access Control)を提案している[10]。TSPC-MACでは、重畳符号化の効果を高めるために、次の3つの仕組みを

提供する。1つ目は、L2バッファに滞留しているデータ量を基に非重畳符号化通信(ユニキャスト通信)と重畳符号化通信を切り替えることである。2つ目は、アクセスポイントと端末間の伝搬ロスとL2バッファに滞留しているデータ量に応じて重畳符号化で割り当てる電力を決定することである。3つ目は、トラフィックに応じてL2バッファでの各フレームの待ち時間を動的に変更することである。TSPC-MACをシミュレーションによって評価した結果、提案方式のスループットがユニキャスト通信と比べて最大1.34倍、既存の重畳符号化通信を用いた方式と比べて最大約1.87倍向上することを明らかになった。現在、GNU Radio上での実装を進めている[50]。

4.2 全二重通信とマルチホップ通信

2節で述べたように、多数の基地局を協調させることで、電波資源の有効利用ができる可能性がある。冒頭でも述べたように、筆者らは基地局に加えて、中継局を利用することも検討している。3.2節で示した無線全二重通信を用いることで、通信スループットを損なうことなく中継局を利用したマルチホップ通信を利用できるからである。

図12に双方向全二重通信と中継全二重通信を示す。既存の全二重通信の研究では、基地局と端末に対して全二重通信を適用することを前提としているため、2ノード間での全二重通信のみに対応している[30]、[31]。本稿では、2ノード間での全二重通信を双方向全二重通信と定義する。図12(a)に双方向全二重通信の例を示す。双方向全二重通信の場合、基地局(AP)と端末(A)間のような双方向での全二重通信しか発生しない。それに対して、基地局から送信されたフレームを中継基地局において受信しながら次のホップにフレームを送信する際にも無線全二重通信を利用できる。中継局を利用した全二重通信を以下では中継全二重通信と呼ぶこととする。図12(b)に中継全二重通信の例を示す。図12(b)では、ノードBが中継局となり、ノードBはノードAからのフレームを受信しながらノードCへフレームを送信している。

このような観点から、筆者らは、マルチホップ通信に対応した全二重通信MACプロトコルの研究を進めている[8]、[9]。文献[8]では、文献[30]、[31]で用いられている無線通信機をそのまま用いて中継全二重を実現できるRFD-MAC(Relay Full-duplex MAC)を提案している。RFD-MACはプライマリ送信とセカンダリ送信を用いる非同期的な全二重通信MACプロトコルである。RFD-MACは傍受したフレームに含まれる次に送るべき後続フレームを保持しているかどうかの1ビットの情報を基にセカンダリ送信の送信元ノードを選択することで、全二重通信の機会を増加させる。RFD-MACをシミュレーションにより評価した結果、CSMA/CAに比べてスループットが約1.6倍向上することが分かった。現在、ライス大学のソフトウェア無線プラットフォームであるWARP[51]上での実装を進めている。

マルチホップネットワークに無線全二重通信を適用した場合、セカンダリ送信衝突問題という無線全二重通信方式特有の問題が発生する。文献[9]では、セカンダリ送信衝突問題を解決するために指向性アンテナを利用したDAFD-MAC(Directional

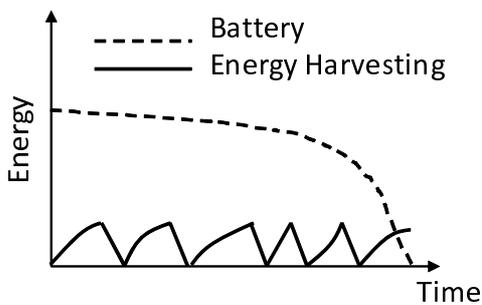


図 13 各端末のエネルギー量の変化

Asynchronous Full Duplex Medium Access Control) を提案している。DAFD-MAC では、セカンダリ送信の宛先ノードがデータフレームを受信しながら、指向性アンテナと無線全二重通信を用いて通信中のノードと反対方向に NAV(Network Allocation Vector) を通知して近隣ノードの通信を延期することで衝突を抑制する。DAFD-MAC をシミュレーションにより評価した結果、既存の方式と比べて最大でスループットが 2.1 倍向上することが分かった。DAFD-MAC に関して、RFD-MAC と同様にソフトウェア無線プラットフォーム WARP [51] 上での実装を進めている。

4.3 環境発電とレートレス符号化

図 13 にバッテリー駆動の端末と環境発電駆動の端末のエネルギー量を示す。環境発電では、バッテリーと異なり、電力の充電と消費を繰り返す不安定な動作モデルとなる。電力供給が不安定であると、各ノードは周囲のノードがその瞬間に受信可能であるか、充電中かを把握することが困難となる。

このような環境発電駆動の電力供給量が常に変動して不安定になるという問題に対し、文献 [52] では、レートレス符号化を適用することで高いデータ収集効率を実現するデータ収集プロトコル Burnet を提案している。Burnet は無線センサネットワークを対象としている。Burnet では、各端末が電力に余力がある限り、レートレス符号化を用いて異なるパケット情報を持つ符号化パケットを生成することで、電力を有効活用しながら無駄な通信を削減している。供給電力の変動によってパケット損失が発生したとしても、符号化パケットから損失したパケットの復号を可能としている。現在、実機による評価の準備を進めている。

現在の無線センサネットワークは低消費電力性の観点から IEEE 802.15.4 [53] などの無線 LAN とは異なる方式で実現されている。しかしながら、実はビット辺りの消費電力を見ると高速な無線 LAN の方が消費電力が低い [54]。このような観点から、筆者は、将来的には無線センサネットワークは無線 LAN に統合されると予想している。

5. おわりに

本稿では、電波資源の極限利用に向けた多数の基地局・中継局連携による無線 LAN 技術の課題は、電波資源を有効利用できていることを示す指標が無いことであると述べた。また、レートレス符号化、干渉除去などの関連研究を示し、多数の基

地局・中継局が連携することで通信性能が向上する可能性があることを述べた。これらの技術をソフトウェア無線による実証ベースで検証することで、今後は電波資源の極限利用に向けた課題をさらに明確化したいと考えている。

文 献

- [1] Y. Kawahara, M. Minami, S. Saruwatari, H. Morikawa and T. Aoyama: “Challenges and lessons learned in building a practical smart space”, Proceedings of The 1st Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services (MobiQuitous’04), Massachusetts, Boston, pp. 213–222 (2004).
- [2] N. Kurata, M. Suzuki, S. Saruwatari and H. Morikawa: “Actual application of ubiquitous structural monitoring system using wireless sensor networks”, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering (14WCEE), Beijing, China, pp. 1–9 (2008).
- [3] H. Si, S. Saruwatari, M. Minami and H. Morikawa: “A ubiquitous power management system to balance energy saving and response time based on device-level usage prediction”, Journal of Information Processing, **18**, pp. 147–163 (2010).
- [4] S. Saruwatari, T. Kashima, M. Minami, H. Morikawa and T. Aoyama: “Pavenet: A Hardware and Software Framework for Wireless Sensor Networks”, Transaction of the Society of Instrument and Control Engineers, Volume E-S-1, 1, pp. 74–84 (2006).
- [5] 鈴木, 猿渡, 南, 森川: “無線センサノードのためのハードリアルタイム保証が可能な仮想マシン”, 電子情報通信学会論文誌, **J92-B**, 1, pp. 130–139 (2009).
- [6] 猿渡, 森川: “社会創造に資するセンシングプラットフォーム”, 情報処理学会誌, **51**, 9, pp. 7–14 (2010).
- [7] S. Saruwatari, M. Suzuki and H. Morikawa: “PAVENET OS: A compact hard real-time operating system for precise sampling in wireless sensor networks”, Transaction of the Society of Instrument and Control Engineers, 2011. (2011).
- [8] K. Tamaki, Y. Sugiyama, A. Raptino, M. Bandai, S. Saruwatari and T. Watanabe: “Full duplex media access control for wireless multi-hop networks”, Proceedings of the IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC’13-Spring), German, Dresden, pp. 1–6 (2013).
- [9] 杉山, 玉置, 猿渡, 渡辺: “マルチホップ無線全二重通信における指向性メディアアクセス制御方式”, 電子情報通信学会論文誌, **J96-B**, 7, pp. 1–15 (2013).
- [10] 青木, 猿渡, 渡辺: “重畳符号化を用いた無線通信における転送量に基づく電力割当方式”, 情報処理学会研究報告, モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, MBL-64-22, pp. 1–8 (2012).
- [11] ISO/IEC: “IEEE 802.11 Standard. IEEE Standard for Information Technology” (1999). ISO/IEC 8802-11.
- [12] M. Vutukuru, H. Balakrishnan and K. Jamieson: “Cross-layer wireless bit rate adaptation”, Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM’09), Barcelona, Spain, pp. 3–14 (2009).
- [13] J. Perry, H. Balakrishnan and D. Shah: “Rateless spinal codes”, Proceedings of the 10th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets-X), Cambridge, Massachusetts, pp. 1–6 (2011).
- [14] J. Perry, P. A. Iannucci, K. Fleming, H. Balakrishnan and D. Shah: “Spinal codes”, Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM’12), Helsinki, Finland, pp. 49–60 (2012).
- [15] P. Iannucci, J. Perry, H. Balakrishnan and D. Shah: “No symbol left behind: A link-layer protocol for rateless codes”, Proceedings of the 18th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom’12),

- pp. 17–28 (2012).
- [16] A. Gudipati and S. Katti: “Strider: Automatic rate adaptation and collision handling”, Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM’11), Tronto, Canada, pp. 158–169 (2011).
 - [17] A. Gudipati and S. Katti: “AutoMAC: Rateless wireless concurrent medium access”, Proceedings of the 18th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom’12), Istanbul, Turkey, pp. 257–268 (2012).
 - [18] GNU Radio: <http://gnuradio.org/>.
 - [19] Ettus Research: “Usrcp (universal software radio peripheral)”, <http://www.ettus.com/>.
 - [20] D. Halperin, T. Anderson and D. Wetherall: “Taking the sting out of carrier sense: Interference cancellation for wireless LANs”, Proceedings of the 14th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom’08), San Francisco, California, pp. 339–350 (2008).
 - [21] X. Su and S. Chan: “High-throughput routing with superposition coding and successive interference cancellation”, Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC’11), Kyoto, Japan, pp. 1–6 (2011).
 - [22] D. Halperin, J. Ammer, T. Anderson and D. Wetherall: “Interference cancellation: Better receivers for a new wireless MAC”, Proceedings of the 6th Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets-VI), College Park, Maryland, pp. 1–6 (2007).
 - [23] H. Takagi and L. Kleinrock: “Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals”, IEEE Transactions on Communications, **32**, 3, pp. 246–256 (1984).
 - [24] S. Vanka, S. Srinivasa, Z. Gong, P. Vizi, K. Stamatiou and M. Haenggi: “Superposition coding strategies: Design and experimental evaluation”, IEEE Transactions on Wireless Communication, **11**, 7, pp. 2628–2639 (2012).
 - [25] J. Feng, R. Zhang and L. Hanzo: “Auction-style cooperative medium access control”, Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC’11-Fall), San Francisco, CA, pp. 1–5 (2011).
 - [26] R. K. Ganti, Z. Gong, M. Haenggi, C. han Lee, S. Srinivasa, D. Tisza, S. Vanka and P. Vizi: “Implementation and experimental results of superposition coding on software radio”, Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC’10), Cape Town, South Africa, pp. 1–5 (2010).
 - [27] L. E. Li, R. Alimi, R. Ramjee, H. Viswanathan and Y. R. Yang: “muNet: Harnessing multiuser capacity in wireless mesh networks”, Proceedings of the 28th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM’09), Rio de Janeiro, Brazil, pp. 2876–2880 (2009).
 - [28] L. E. Li, R. Alimi, R. Ramjee, J. Shi, Y. Sun, H. Viswanathan and Y. R. Yang: “Superposition coding for wireless mesh networks”, Proceedings of the 13rd ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom’07), Montreal, Canada, pp. 330–333 (2007).
 - [29] S. Gollakota and D. Katabi: “ZigZag decoding: Combating hidden terminals in wireless networks”, Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM’08), Seattle, Washington, pp. 159–170 (2008).
 - [30] J. I. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis and S. Katti: “Achieving single channel, full duplex wireless communication”, Proceedings of the 16th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom’10), Chicago, Illinois, pp. 1–14 (2010).
 - [31] M. Jain, J. I. Choi, T. M. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti and P. Sinha: “Practical, real-time, full duplex wireless”, Proceedings of the 17th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom’11), Las Vegas, NV, pp. 301–312 (2011).
 - [32] A. Sahai, G. Patel, C. Dick and A. Sabharwal: “Understanding the impact of phase noise on active cancellation in wireless full-duplex”, Conference Record of the 46th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, California, pp. 29–33 (2012).
 - [33] M. D. Evan Everett, C. Dick and A. Sabharwal: “Empowering full-duplex wireless communication by exploiting directional diversity”, Conference Record of the 45th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, pp. 2002–2006 (2011).
 - [34] A. Sahai, G. Patel and A. Sabharwal: “Pushing the limits of full-duplex: Design and real-time implementation”, Technical report, Rice University (2011).
 - [35] M. Duarte and A. Sabharwal: “Full-duplex wireless communications using off-the-shelf radios: Feasibility and first results”, Conference Record of the 44th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, California, pp. 1558–1562 (2010).
 - [36] H. V. Balan, R. Rogalin, A. Michaloliakos, K. Psounis and G. Caire: “Achieving high data rates in a distributed MIMO system”, Proceedings of the 18th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom’12), Istanbul, Turkey, pp. 41–52 (2012).
 - [37] C. Shepard, H. Yu, N. Anand, L. E. Li, T. Marzetta, R. Yang and L. Zhong: “Argos: Practical base stations with large-scale multi-user beamforming”, Proceedings of the 18th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom’12), Istanbul, Turkey, pp. 53–64 (2012).
 - [38] E. Aryafar, M. A. Khojastepour, K. Sundaresan, S. Rangarajan and M. Chiang: “MIDU: Enabling MIMO full duplex”, Proceedings of the 18th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom’12), Istanbul, Turkey, pp. 257–268 (2012).
 - [39] S. Gollakota, S. D. Perli and D. Katabi: “Interference alignment and cancellation”, Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM’09), Barcelona, Spain, pp. 159–170 (2009).
 - [40] K. Tan, H. Liu, J. Fang, W. Wang, J. Zhang, M. Chen and G. M. Voelker: “SAM: Enabling practical spatial multiple access in wireless LAN”, Proceedings of the 15th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom’09), Beijing, China, pp. 49–60 (2009).
 - [41] V. Raghunathan, A. Kansal, J. Hsu, J. Friedman and M. Srivastava: “Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems”, Proceedings of the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN’05), Los Angeles, California, pp. 457–462 (2005).
 - [42] M. Minami, T. Morito, H. Morikawa and T. Aoyama: “Solar biscuit: A battery-less wireless sensor network system for environmental monitoring applications”, Proceedings of the 2nd International Workshop on Networked Sensing Systems (INSS’05), San Diego, CA (2005).
 - [43] P. D. Mitcheson, T. C. Green, E. M. Yeatman and A. S. Holmes: “Architectures for vibration-driven micropower generators”, Journal of Microelectromechanical Systems, **13**, 3, pp. 429–440 (2004).
 - [44] Y. Ammar, A. Buhrig, M. Marzencki, B. Charlot, S. Basrour, K. Matou and M. Renaudin: “Wireless sensor net-

- work node with asynchronous architecture and vibration harvesting micro power generator”, Proceedings of the 2005 Joint Conference on Smart Objects and Ambient Intelligence, Grenoble, France, pp. 287–292 (2005).
- [45] H. Nishimoto, Y. Kawahara and T. Asami: “Prototype implementation of ambient RF energy harvesting wireless sensor networks”, Proceedings of the IEEE Sensors, Waikoloa, Hawaii, pp. 1282–1287 (2010).
- [46] W. C. Brown: “The history of power transmission by radio waves”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **32**, 9, pp. 1230–1242 (1984).
- [47] W. C. Brown and E. E. Eves: “Beamed microwave power transmission and its application to space”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **40**, 6, pp. 1239–1250 (1992).
- [48] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljacic: “Magnetic resonances wireless power transfer via strongly coupled”, Science, **317**, 82, pp. 83–86 (2007).
- [49] Y. Narusue, Y. Kawahara and T. Asami: “Impedance matching method for any-hop straight wireless power transmission using magnetic resonance”, Proceedings of the IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS’13), Austin, Texas, pp. 193–195 (2013).
- [50] 山崎, 青木, 猿渡, 渡辺: “Gnu radio を用いた重畳符号化の初期的実装”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-17-5 (2012).
- [51] Rice University: “WARP, Rice University open-access research platform”, <http://warp.rice.edu/trac/>.
- [52] 稲葉, 猿渡, 渡辺: “電源供給が不安定な環境発電型無線センサネットワークへのレートレス符号の適用について”, 情報処理学会全国大会, 1Y-6, pp. 1–2 (2013).
- [53] J. A. Gutierrez, M. Naeve, E. Callaway, M. Bourgeois, V. Mitter and B. Heile: “Ieee 802.15.4: A developing standard for low-power, low-cost wireless personal area networks”, IEEE Network, Vol. 15, pp. 12–19 (2001).
- [54] 瀧口, 森戸, 猿渡, 南, 森川: “ウェイクアップ型無線モジュールにおける通信時の消費電力に関する検討”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-5-79 (2008).