

THE IEICE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS (JAPANESE EDITION)

IEICE 電子情報通信学会 **B** 論文誌

通 信

DOI:10.14923/transcomj.2018MOP0006

早期公開日:2019/03/05

本PDFは、早期公開版である。本論文を引用する場合には、電子情報通信学会和文論文誌投稿のしおり(情報・システムソサイエティ)の「8.早期公開」を参照すること。

通信ソサイエティ

一般社団法人 電子情報通信学会

THE COMMUNICATIONS SOCIETY

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

端末間協調省電力通信フレームワーク ——実機実験を用いた有効性の評価——

服部 聖彦^{†a)} 天間 克宏^{††} 趙 欧^{††} 単 麟^{††} 安達 文幸^{†††}
大和田 泰伯^{††}

D2D Cooperative Communication Framework for Energy Saving: Evaluation of Energy Efficiency using Smartphone Test-Bed

Kiyohiko HATTORI^{†a)}, Katsuhiro TEMMA^{††}, Ou ZHAO^{††}, Lin SHAN^{††}, Fumiyuki ADACHI^{†††},
and Yasunori OWADA^{††}

あらまし 無線端末の消費電力においてワイドエリアネットワーク(WAN)通信が占める割合は無視できないほど大きく、通信の省電力化が強く求められているが、基地局-端末間距離という物理的な制約があるため容易ではない。この課題に対し、我々は近隣の端末群を協調させることで省電力通信を行う新たなフレームワークを提案している。具体的には位置的に近い複数のモバイル通信端末を協調させることにより、端末群全体から見た通信効率向上および省電力化を目指すものである。このフレームワークでは、協調する端末に無線WANを通じてネットワークを提供する代理端末(プロキシ端末)の選択が重要であり、バッテリー残量や通信スループット、受信信号強度などの複合的な要因に影響される。本論文では、試作端末による実験に基づき、提案フレームワークの有効性について検討を行った。具体的には Long Term Evolution (LTE)消費電力計測用テストベッドおよび端末協調通信評価用スマートフォンアプリを構築し、実環境での評価実験を行った。その結果、提案している端末協調フレームワークにより最大で47%の省電力化を実現できることが明らかになった。

キーワード 端末間協調、省電力通信、通信エネルギー効率、自律分散制御

1. まえがき

近年、LTE等の高速WANの普及に伴い無線通信に要する電力消費が無視できないほどに増加し、周波数利用効率の向上と共に省電力化が叫ばれるようになっている。特にバッテリー駆動であるスマートフォン等のモバイル通信端末における省電力化は非常に重要な課題である。しかしながら現状のアプローチでの省電力効化には限界があり、大幅な電力効率の改善は容易で

はない。その大きな原因の一つとして、既存の技術・研究が個別端末と基地局との通信という観点からの省電力に焦点を当てていることが挙げられる。また、携帯端末の受信性能の向上やバッテリー消費、携帯端末をノードとする分散ネットワークに関する研究は数多くなされている一方で、通信スループット、バッテリー残量、受信レベルおよび端末位置情報などを統合的に考慮した省電力化の検討は十分にはなされていない。この課題に対し我々は位置的に近い端末群を協調制御させ、端末群全体から見た通信電力の最適化という形で大きく視点を変えることにより、今までと全く異なる形での通信エネルギー効率の向上を実現する端末間協調・省電力フレームワーク[1],[2]を提案している。本論文ではその端末間協調・省電力フレームワークの有効性を検証するため、(1)LTE消費電力計測用テストベッド、(2)端末協調スマートフォンアプリの2つを作

[†] 埼玉工業大学, 埼玉県

Saitama Institute of Technology, 1690, Fusaiji, Fukaya, Saitama, 369-0203, Japan

a) E-mail: hattori@sit.ac.jp

^{††} 国立研究開発法人 情報通信研究機構, 東京都

National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

^{†††} 東北大学 電気通信研究機構, 宮城県

Research Organization of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8577, Japan

成し、実環境で実験を行った。

以下2章では関連研究をまとめ、3章において提案している端末間協調・省電力フレームワークを説明する。4章においてLTE消費電力計測用テストベッドの説明と実験結果をまとめるとともに、5章において端末協調スマートフォンアプリの説明と実験結果を紹介する。そして最後の6章において本論文をまとめる。

2. 関連研究

端末群の協調制御による端末群全体から見た無線通信の伝送品質、エネルギー効率の改善について、数多くの研究がなされている。

無線通信の伝送特性改善を目的とした、マルチユーザ Multi-Input Multi-Output (MU-MIMO)へのユーザ端末共同干渉キャンセルが文献[3]~[5]で検討されている。近隣の端末で受信信号および伝搬路情報を共有し、MU-MIMOにおけるユーザ間干渉抑圧を受信端末群が連携して行うことで、基地局側のみによるユーザ間干渉抑圧と比較して伝送特性を大幅に改善できることが示されている。文献[3]~[5]における検討は伝送特性の改善を目的としており、電力効率や消費電力については検討がなされていない。

文献[6]では、短距離無線通信デバイスを利用した端末間連携による無線通信の省電力化に関する検討がなされている。スマートフォン等の端末には既にBluetoothやIEEE802.11無線LANなどの短距離無線通信デバイスが搭載されていることを指摘し、WiMAXなどの長距離無線通信デバイスで通信する1台の端末が短距離無線通信で周辺端末を収容するネットワークを構築することで、端末が各々長距離無線通信デバイスで通信する場合と比較して通信のエネルギー効率を改善できることを数値解析によって示している。文献[6]における検討では、各無線通信方式で規定されている送受信電力に基づいて数値解析がなされているが、エネルギー効率に大きく影響する伝搬損失について考慮されていない。また、長距離無線通信デバイスで通信する端末の選択方法、および周辺端末の収容方法についても検討されていない。

端末間連携による無線通信の省電力化に関する検討として、文献[7]で複数の通信回線を利用し無線WANを有効利用する通信プロトコルが検討されている。Webコンテンツの取得に要する消費電力を低減するため、無線WANと無線LANの消費電力差を利用し、各端末が無線WANで目的のコンテンツの一部を

分散受信した後に省電力な無線LANでコンテンツ情報を共有することで、端末が各々無線WANで全てのコンテンツをダウンロードする場合からの消費電力低減を図っている。文献[7]における検討はHTTPコンテンツの分散受信、共有を対象としており、端末間連携のための物理層の接続制御については検討していない。また、省電力通信プロトコルについても設計法の提案のみで、具体的な省電力効果については検討されていない。

一方、センサーネットワークの研究に焦点をあけると、文献[8]に代表されるようにクラスターを構築し、クラスターヘッドの役割を分担することで群全体として省電力性の向上が可能なことが明らかになっているが、バッテリー容量の均一性を仮定していることが多く、加えて端末のモビリティ等も仮定していない。また、バッテリー容量の不均一性を考慮している検討[9]もあるが、クラスターヘッド選択時にエネルギー効率に大きく影響する瞬時のクラスターヘッド-シンクノード間の伝搬損失について考慮されていない。

3. 協調フレームワークの概要

我々が提案しているフレームワーク[1],[2]によって構築される端末間協調ネットワークを図1に示す。各端末は、基地局とのWAN通信機能(LTE, WiMAX等)、端末間で協調制御を行うためのBluetooth Low Energy (BLE)および回線共有無線LANに加え、あらかじめ端末協調制御ソフトを保持しているものとする。ここでBLEおよび無線LANの実効通信距離を10メートル程度と想定しており、10メートルが本研究で考える端末群の協調エリアのサイズの一つの目安になる。



図1 端末協調フレームワークの概要
Figure 1 Framework of Terminal Cooperation.



図2 バッテリー低下時のプロキシ端末の変更例
Figure 2 Proxy Changing Depending on a Low-Battery Power.

提案するフレームワークに従って協調通信を行う場合、最初に各端末は自身の通信状況、バッテリーなどの情報を BLE のビーコンを用いて近隣端末に送付、協調通信制御のための情報を交換する。次に他の近隣端末から受信した情報と自身の情報を自身のローカルメモリ上にデータベースを構築、記録する。それらの情報をもとに提案するアルゴリズムを用いて端末集合全体から最も適切な代理(プロキシ端末)を選択、決定する(図1ではバッテリー残量が多く、かつ基地局との通信特性が良い端末をプロキシ端末として選択)。プロキシとして選定された端末は自身の WAN インタフェースにより基地局を介してネットワークに接続すると同時に自身の無線 LAN の基地局機能を起動する。一方、プロキシ端末に選択されなかった他の端末は、自身の無線 LAN のクライアント機能を用いてプロキシ端末に接続、プロキシ端末経由でネットワークにアクセスする。プロキシ選定は定期的に行われ、現在使われているプロキシ端末のバッテリー残量が低下、もしくは移動等により基地局との通信特性が劣化し、プロキシ端末として適切ではなくなった場合には図2で示すようにプロキシ端末の自動・動的切り替えが行われる。この図2ではプロキシ端末のバッテリー低下を想定し、プロキシ端末はバッテリー残量低下を BLE ビーコンによって端末集合全体に通知している。通知を受

信した他の端末は先と同様に協調通信制御用の各種情報を再度 BLE ビーコンによって共有、式(1)から求められる評価値 Z の値が最も大きい端末が最適なプロキシ端末として選択される。ここで式(1)における $E_{\text{remaining}}$, E_{max} はそれぞれ端末のバッテリー残量(mAh)、バッテリー容量(mAh)を表す。式(1)の第1項は端末のバッテリー状況を考慮するもので、0~1 の値を取り、1に近いほどバッテリー残量が多い、つまりプロキシ端末に適していることを評価値に反映する。 P_{rx} は無線 WAN の受信電波強度(dBm)である。本論文では、無線 WAN として LTE を想定し、受信電波強度として Reference Signal Received Power(RSRP)[10]を用いている。後述する実験での検討において、筆者らの屋内測定環境では RSRP は概ね-80 から-90dBm 程度であった。そこから、RSRP の変動幅を $-60\text{dBm} \leq P_{rx} \leq -120\text{dBm}$ と推定し、RSRP が大きい端末がプロキシ端末に適していることから、式(1)の第2項を $P_{rx} = -60\text{dBm}$ の場合に1、 $P_{rx} = -120\text{dBm}$ の場合に0となるように設計している。以上より、評価値 Z は $0 \leq Z \leq 200$ となるように設計しており、バッテリー残量が多いほど、また LTE の RSRP が大きいほど200に近い値を取る。ただし、バッテリー残量には閾値を設定でき、その値を下回った端末は Z の値にかかわらずプロキシ端末にならない仕組みを導入可能である。本来であれば前のステップとして、(a)バッテリー残量が閾値(例えば30%)以上、かつ(b)LTEの電波が通信を行う上で必要強度以上という(a)、(b)両方の判定ルーチンをパスした端末群のみをプロキシ候補とし、それらに対し式(1)を用いて適切なプロキシを選定することが望ましい。ここで本論文では、端末の協調によって端末群全体で通信エネルギー効率 bits/J がどの程度改善されるかに焦点を当ており、実験では常に外部から電力供給を行いながらシステムに使用された消費電力を測定することによって通信に必要な電力を測定・評価を行った。

$$Z = \left[\frac{E_{\text{remaining}}}{E_{\text{max}}} + \left\{ 2 + \frac{P_{rx}}{60} \right\} \right] \times 100 \quad (1)$$

旧プロキシ端末を含めたその他の端末は、通知された情報に基づき新たなプロキシ端末に無線 LAN 接続する。その際、旧プロキシ端末は、無線 WAN によるデータ通信を停止する。このように、BLE ビーコンによって端末群で情報を共有、式(1)に基づいて適切なプロキシ選択、協調制御を行うことで、常に電力効

率の高い端末群協調ネットワークの構築が可能となる。

4. 通信電力効率測定用テストベッドを用いた実験

先に述べた端末間協調・省電力フレームワークを構築するにあたり、事前準備実験として国内で広く普及している WAN の一つである LTE に着目し、LTE の(1)通信スループット、(2)消費電力、(3)RSRP の関係を実験により検証した。実験を行うにあたり、図 3 左に示すように小型マイコンボード Raspberry Pi と Raspberry Pi 専用 LTE 通信モジュール LTEPi (au KDDI 800MHz 帯を使用)を用いてテストベッド端末を作成した。図 3 右では LTE のアンテナを 800MHz 対応の電波吸収体で囲い、疑似的に電波伝搬環境を劣化させて実験を行っている。端末協調に用いる無線 LAN 通信モジュールにはバッファロー社製の USB 無線 LAN モジュール (WLI-UC-GNM)を用い、Raspberry Pi の USB2.0 インタフェースに接続している。消費電力の測定には 0.1mA の測定分解能を持つデジタル電流・電圧・電力計 INA226 I2C を 2 台用いて独立に(1)テストベッド端末全体の消費電力と(2)LTE モジュール単体の消費電力を 10msec 間隔で測定した。本実験では通信帯域測定に広く使われている測定ツール Iperf2 を用いて上りリンク UDP トラフィックを発生させ、測定に用いた。実験ではトラフィック発生時間は 10 秒間とし、送信スループット(bits/sec)と LTE の受信強度 RSRP をそれぞれ独立に変化させながら各送信スループットにおける RSRP と LTE 通信モジュール消費電力をそれぞれ測定し、10 秒間にサーバ側で受信できた総データ量と総消費電力をもとに 1 秒当たりのスループットと消費電力(W)を算出、評価に用いた。測定実験の場所としては横須賀の NICT ワイヤレスネットワーク研究センターがある YRP センター1 番館 2 階会議室を利用し、設置場所の変更と電波吸収体の併用によって LTE の RSRP が -80dBm, -90dBm, -102dBm, -113dBm となる環境を模擬した。なお LTEPi 単体では LTE の電波強度を測定できないため、図 3(左)に示すように LTEPi と同じキャリア SIM を用いた富士通製スマートフォン(arrows M02)を併用し、各設置場所および図 3(右)で示すように電波吸収体を使用して測定した。無線 LAN モジュールの測定実験では、無線 LAN モジュールのみを試作端末に接続し、トラフィック発生時の端末全体の平均消費電力の測定値から Raspberry Pi の平均消費電力を減算することで、無線 LAN モジュール単

体の消費電力を導出した。なお無線 LAN の通信モードは IEEE802.11g 54Mbps モードとした。



図 3 通信電力効率測定用テストベッドおよび電波吸収体を用いた実験風景

Figure 3 Communication Power Efficiency Measurement Testbed and Radio Wave Absorber.

4.1 実験結果

LTE モジュール 1 台を用いた時の異なる LTE 電波伝搬環境におけるスループットと消費電力の関係の測定結果を図 5 に示す。この図 5 における横軸は UDP アップロードの実効スループット値(Mbps)、縦軸はアップロードに使用する LTE 通信モジュール部の消費電力の平均値(W)を表す。先に述べた 4 つの RSRP で実験、測定した結果をプロットするとともに、回帰分析で線形近似した結果を示す。また、参考として無線 LAN を用いて 2 台の端末間で通信を行った場合の消費電力とスループットの結果を計測した結果、ダウンロード、アップロード、設定スループットにほとんど相関なく約 0.1W 前後の消費電力であった。以下の図 4 に本実験で用いた無線 LAN モジュールにおけるスループットと消費電力の測定結果を示す。同様に次の図 5 において LTE モジュールにおけるスループットと RSRP、消費電力の測定結果を示す。図 4, 5 からわかるように、LTE 通信モジュール部の消費電力は無線 LAN 通信に比べて 12 倍から 30 倍程度大きいことがわかる。

次の図 6 は、図 5 のデータを基に、RSRP ごとに異なる実効スループットと消費電力の関係を回帰分析により三次元グラフで表したものであり、横軸がそれぞれ実効スループット(Mbps)と RSRP、縦軸が平均消費電力(W)を表す。

4.2 考察

図 5 から分かるように RSRP が小さくなるにつれて、実効スループットの最大値が小さくなる傾向がある。これは RSRP の劣化に伴う変調方式等の LTE の伝送パラメータ制御によるものであると考えられる。また、RSRP が小さくなるにつれて、送信に必要なエネルギーが大きくなる傾向がある。特に -80dBm と

-102dBmに着目すると、-80dBmで1Mbpsから6Mbpsへスループットを6倍に上昇させた場合に必要なエネルギーの増加量が約0.1Wなのに対し、-102dBmでは約0.8Wと消費電力の増加量が8倍も大きくなっている。これはRSRPが小さい状況において高速の通信を行うために、LTEの制御系が送信電力を強くする制御を行っているからだと考えられる。

次に、図5の測定結果を三次元グラフに表した図6を見ると、RSRPがある程度大きい場合にはスループットの上昇と消費電力の上昇の相関関係は非常に小さい一方、RSRPが小さくなるにつれて、スループットの上昇と消費電力の上昇の相関関係が急激に強くなっていることが見て取れる。見方を変えると、RSRPが大きい端末において達成可能なスループットに対し、それよりも遅い通信をした場合での省電力効果がほとんどないと言える。これはLTEの設計が高速通信を前提としており、低速通信時の通信電力効率をあまり考慮していないことがその原因の一つとして考えられる。最後にRSRPと設定スループットおよび実効スループットの関係を表1にまとめる。この表から、RSRPが悪く、そして設定スループットが大きくなるにつれ、設定スループットと実効スループットと乖離が大きくなることがわかる。理由は先と同じようにRSRPが悪い環境では、送信電力を上げたとしても達成可能なアップロード速度の限界が低いからだと推測される。

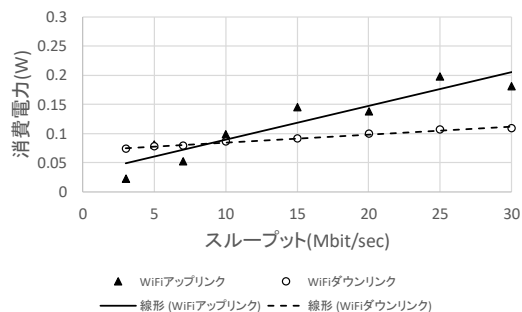


図4 無線LANモジュールにおける実効スループットと平均消費電力の関係

Figure 4 Relation between Effective Throughput and Average Power Consumption of Wireless LAN

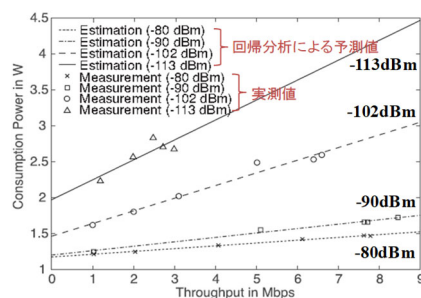


図5 RSRP、実効スループットと平均消費電力の関係
Figure 5 Relation among RSRP, Effective Throughput and Average Power Consumption.

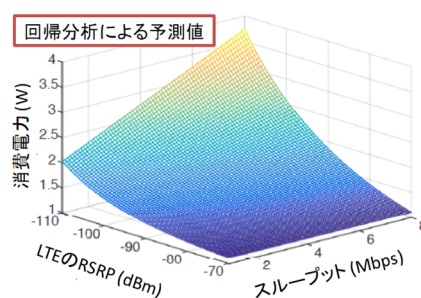


図6 RSRP、実効スループットと消費電力の関係を回帰分析で近似した三次元グラフ

Figure 6 Three-Dimensional Graph Approximated by Regression Analysis of Figure 5.

表1 RSRPと設定スループットおよび実効スループットの関係
Table 1 Relationship among RSRP and Set Throughput and Effective Throughput.

RSRP(dBm)	設定スループット (Mbps)	実効スループット (Mbps)	実効スループット / 設定スループット (%)
-80	1	1.03	103%
	2	2.04	102%
	4	4.07	102%
	6	6.12	102%
	8	7.78	97%
	10	7.62	76%
-90	1	1.03	103%
	5	5.10	102%
	10	7.71	77%
	12	8.45	70%
	14	7.63	55%
	1	1.01	101%
-102	2	2.01	101%
	3	3.11	104%
	5	5.02	100%
	8	8.40	80%
	10	6.80	68%
	1	0.97	97%
-113	2	1.99	100%
	3	2.89	100%
	4	2.48	62%
	5	2.72	54%

以上より、端末から基地局へのアップロードを行う場合、図6の結果から読み取れるように、RSRPの劣化による電力消費の上昇度合が急激になる90dBmよりもRSRPの大きい端末が達成可能なスループット上限に近い値で通信することがエネルギー効率の高いLTE通信を行う上で望ましいことが分かる。

5. スマートフォンアプリを用いた協調通信

による実験と評価

ここでは、通信の効率を考える一つの指標として、通信エネルギー効率というものを考える。これは、1 ジュール(J)あたりに送れる情報量(bit)を表すもので、単位は bits/J になる。先の通信電力効率テストベッド実験から、RSRP の大きい端末が達成可能なスループットに近い速度で通信を行う場合に最も通信エネルギー効率がよいことがわかる。これは速度上昇による送信データ量の増加率に対して、消費電力の増加率が非常に緩やかなためである。しかしながら、この特性は見方を変えたと低速通信時には低速化における消費電力低下の割合が非常に小さいため、通信エネルギー効率で見ると劣化してしまうことがわかる。しかしながら、昨今のスマートフォンで多く利用されている「無料通話アプリやボイスチャットの利用」[11]ではLTEの達成可能なスループットに近い速度で通信しているとは言い難く、そこから生じる通信エネルギーの非効率性は大きな問題である。

これらを踏まえ、本研究では個別の端末が LINE, Skype 等のパケット交換による音声通信をしている場合を想定し、低ビットレートの連続アップリンク伝送が継続的に発生しながらもLTEの達成可能スループット以下の速度で通信している状況において、提案している端末間協調省電力フレームワークを用いてプロキシを選定、近隣端末群の低速通信デマンドを無線 LAN で集約、プロキシ端末の LTE でまとめて通信することで通信エネルギー効率の向上の可能性について実験を通して検証する。

5.1 スマートフォン協調通信制御アプリ

本検証では、スマートフォンを協調させるためのスマートフォン協調通信制御アプリを新たに構築、バッテリーが取り外し可能な ASUS 社製端末 Zenfone2 Laser にインストールして実験を行った。ここで図 7 を用いて協調通信制御アプリ(以下、制御アプリ)の動作概要を説明する。

実験には、協調動作を制御・モニターするモニター制御端末とモニター制御端末の制御パラメータに基づいて協調通信を行う端末がある。さらに協調通信を行う端末は一台のプロキシ端末とプロキシ端末経由で通信を行う複数のクライアント端末に分かれる。実験を開始する場合、モニター制御端末から近隣の端末に対し、BLE ビーコンを用いて測定開始要求が広告され、

それを受信した各端末は「同期」モードに移行、モニター制御端末から配布される制御通信パラメータの同期を行う。今回の実験では本状態を 30 秒と設定する。同期が終了後、そのまま「設定デマンドによるアップロード」モードに自動移行、各端末自身の LTE を用いてネットワークに接続、LTE を用いて設定スループットでアップロードを行い、実効スループットを測定する。なお、デフォルトの測定時間は 20 秒である。

次に測定された結果は「測定情報共有」モードで先と同じく BLE ビーコンを用いて共有される。「測定情報共有」のデフォルト時間は 20 秒である。

各端末は他の端末から送られた情報をもとに「プロキシ端末決定」モードにおいて個別にデータベースを生成する。次の表 2 に「測定情報共有」で交換、構築されたデータベースの項目を記載する。生成されたデータベースの情報を用いて先の式(1)から求められる評価値が最大の端末がプロキシ端末となり、無線 LAN のアクセスポイント機能を用いて他の端末を收容、インターネットサービスを提供する。今回の実験では本状態を 30 秒と設定する。30 秒が経過した後、再度「設定デマンドによるアップロード」モードに移行する。

ここでデータベースの同期について説明する。先の説明であったように、本システムはブロードキャストベースでの制御情報を基本とするため、当然衝突による情報落ちからデータベースの同期に失敗することが起こり得る。その場合、同期できている端末群の中で最良のプロキシが選ばれ、通信が開始される。

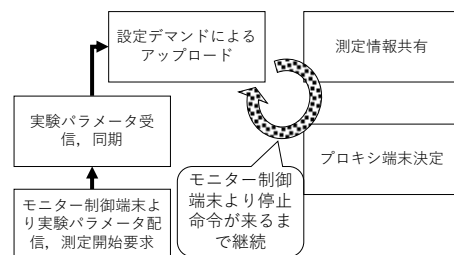


図 7 協調通信制御アプリの協調通信動作状態遷移図
Figure 7 Operational State Transition of Cooperative Communication Control.

表 2 測定結果共有時に端末間で交換される情報
Table 2 Information Detail Exchanged among Terminals.

名称	単位	説明
Node ID	なし	システム起動時に自動で設定されるユニーク ID
バッテリー残量	mAh	
LTE 通信量	bps	

BT 電波強度	dBm	BLE の受信電波強度 RSSI
受電フラグ	なし	端末が外部から電力供給を受けているかを表すフラグ
評価値	なし	該当端末がプロキシとして適している度合
LTE 電波強度	dBm	LTE の受信電波強度 RSRP
通信エネルギー効率	bits/j	1 ジュールあたりに送れる bit 数

5.2 実験設定

本実験では、NTT ドコモ社の LTE 回線を用いた MVNO サービスを提供している mineo 社の mineo 法人向けプラン(Xi(クロスシィ)対応)を用いた。実験の組み合わせとしては(1)協調なし(自身の LTE で通信)、(2)2 台協調(1 台がプロキシ端末、もう 1 台はプロキシ端末を無線 LAN 接続して通信するクライアント端末)、(3)4 台協調(1 台がプロキシ端末、残り 3 台はプロキシ端末を無線 LAN 接続して通信するクライアント端末)の 3 組みを用いた。各端末にあらかじめインストールしてある Iperf3 を用い、そこから別途用意した Iperf3 サーバに対し、自身の LTE もしくはプロキシサーバ経由で UDP のアップロードを行うことで通信デマンドを生成する。今回用いた通信デマンドは 0.7Mbps, 1.4Mbps, 2.8Mbps の 3 種である。通信デマンドは個々の端末から発生するものを考える。すなわち、2 台の端末が 1.4Mbps の通信デマンドを持っているときに、協調して通信を行う場合、プロキシ端末からは $1.4 \times 2 = 2.8\text{Mbps}$ でデータがアップロードされることになる。同様に 4 台連携で各端末が 1.4Mbps の通信デマンドを持つ場合、プロキシ端末からは $1.4 \times 4 = 5.6\text{Mbps}$ でデータがアップロードされることになる。このデータは先の総務省の資料[11]にある多く利用されている「無料通話アプリ、やボイスチャットの利用」を想定し、比較的低レートの連続データ伝送を模したものである。なお、本実験におけるクライアント動作時においても LTE モジュールは常に待ち受け状態である。

本研究において通信に使用された消費電力を正確に計測するために、図 8 に示すように今回新たに消費電力測定回路を制作した。これは、消費電力を測定するモジュールであるアナログ・デバイセス社製の LTC 2947 二台と制御マイコンである Arduino ADK から構成される。Arduino ADK は Android スマートフォンと連携するために使用するマイコンであり、Arduino からの制御通信と電力給電の両方が同時に可能である。本来であれば、バッテリーと端末本体の間に消費電力測定モジュールである LTC 2947 を組み込み、測定値を

Arduino ADK 経由で Android スマートフォンに送信すればよいが、先に述べたように Arduino ADK は通信と給電を同時にしてしまうため、端末本体の純粋な消費電力を測定することができない。そこで、システム構成図に示すように LTC 2947 を二つ使い、Arduino ADK から Android に送られる電力とバッテリーに充電される電力の二つを測定し、差分を取ることで端末本体が消費しているリアルタイムの電力を測定している。詳細な実験の設定値を表 3 にまとめる。

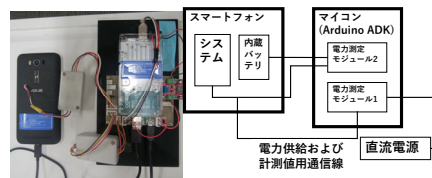


図 8 消費電力測定回路およびシステム構成図

Figure 8 Power Consumption Measurement Circuit and System Configuration Diagram

表 3 協調通信実験設定値

Table 3 Parameters of Cooperative Communication Experiments.

協調端末台数	協調なし, 2 台協調, 4 台協調
通信タイプ	UDP, アップロード
端末の通信デマンド (設定スループット)	0.7Mbps(4 台協調のみ), 1.4Mbps, 2.8Mbps, 7Mbps(協調無しのみ)
実験時の端末 RSRP	弱(-98dBm 程度, 協調無しのみ), 中(-85dBm 程度), 強(-75dBm 程度)の 3 種
アップロード送信時間	120 秒
実験場所	NICT 耐災害 ICT 研究センター(仙台), 埼玉工業大学(深谷)

5.3 実験結果(協調なし)

図 9 に仙台の NICT 耐災害 ICT 研究センターで行った端末単体での協調なし通信実験の結果を示す。各グラフにおける縦軸は送信した総データ量(bit)を送信に要した消費電力から求められる総エネルギーであるジュール(J)で割った通信エネルギー効率(bits/J)を表す。図 9 は協調しない場合での通信デマンド, RSRP と bits/J の関係を表す。ここで、図 9 は端末間の協調がない端末単体での通信時において RSRP が大きい場合と小さい場合の 2 つの環境を構築し、通信デマンドに 1.4Mbps, 2.8Mbps, 7Mbps の 3 つを設定して実験をした結果である。このグラフから分かるように通信デマンドが大きくなるほど、そして RSRP が大きいほど通信エネルギー効率 bits/J が向上していることがわかる。

5.4 実験結果(協調・端末間距離固定)

図 10, 11, 12 に端末間距離を 0.5m で固定した場合の協調通信による実験の結果を示す。この実験は埼玉

工業大学で実施しており、比較用に端末単体での測定実験も同じ場所で行った。図 10 から 12 は 2 台および 4 台の端末が協調する場合での通信デマンドと RSRP と bits/J の関係を表す。なお、評価に使用する通信エネルギー効率は端末群全体の総消費エネルギー(無線 LAN および Bluetooth の両方の消費エネルギーを含む)、総送信ビット量から求められる。すなわち、2 (4)台の場合、2 (4)台の端末から送信された総ビット量を 2 (4)台の端末の消費エネルギーの和で除算することで求められる。

次の図 10 は 2 台協調時において、先と同様に RSRP が大きい場合と小さい場合の 2 つの環境を構築、通信デマンドには 1.4Mbps, 2.8Mbps の 2 つを設定して実験をした結果である。このグラフから分かるように、端末数が 2 台で RSRP が比較的大きい場合、協調の効果は小さい。これは、協調することによって無線 LAN および BLE の消費電力が追加されることに加え、RSRP が大きいため、個別に通信をしてもそれほど消費電力が増えないからである。一方で図 11 は、2 台の端末のうち、1 台は RSRP が悪い状況を模した場合である。この場合、RSRP が大きい端末がプロキシ端末となることで、端末群全体としての通信エネルギー効率が向上している。

図 12 は 4 台の端末で協調した場合の結果である。この図からわかるように、全てのケースで、協調することによって、通信エネルギー効率が向上している。これは、4 台の端末が個別に LTE モジュールを使用するよりも、無線 LAN で収容、通信をまとめてプロキシ端末 1 台の LTE で通信する方が通信エネルギー効率が良いからだと考えられる。4 台の場合、協調することで最大で 47%の電力効率が向上することがグラフから読み取れる。

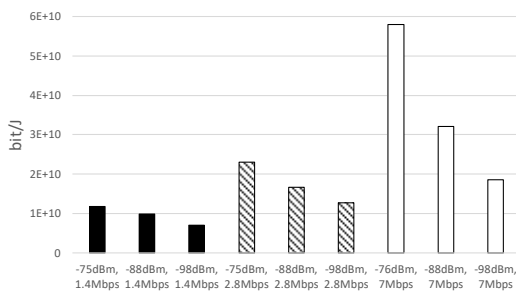


図 9 協調なし UDP アップリンク時の RSRP, 通信デマンドと通信エネルギー効率の関係
Figure 9 Relation among RSRP, Communication Demand, and Energy Efficiency without Cooperation.

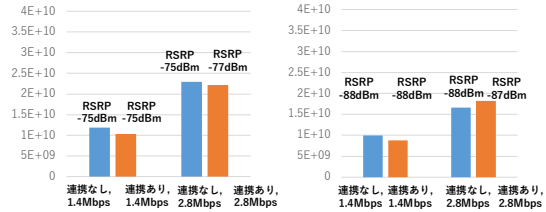


図 10 2 台協調時の RSRP(-75dBm, -88dBm), 通信デマンド (1.4Mbps, 2.8Mbps)と通信エネルギー効率の関係
Figure 10 Relation among RSRP(-75dBm, -88dBm), Communication Demand(1.4Mbps, 2.8Mbps), and Energy Efficiency with Two Terminals Cooperation.

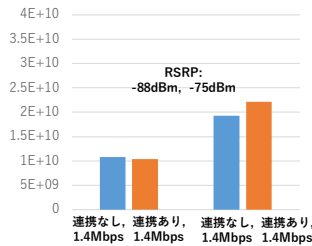


図 11 2 台協調時の RSRP(プロキシ-75dBm, クライアント-88dBm), 通信デマンド(1.4Mbps)と通信エネルギー効率の関係
Figure 11 Relation among RSRP (Proxy: -75dBm, Client: -88dBm), Communication Demand(1.4Mbps), and Energy Efficiency with Two terminals Cooperation.

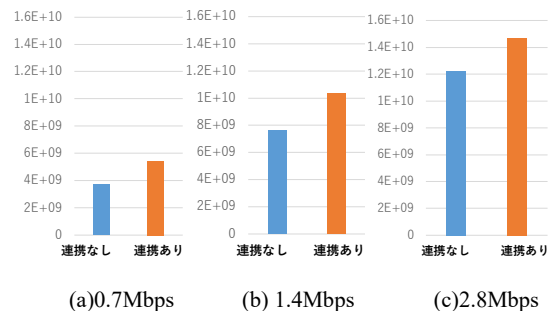


図 12 4 台協調時の RSRP, 通信デマンドと通信エネルギー効率の関係
Figure 12 Relation among RSRP, Communication Demand, and Energy Efficiency with four terminals Cooperation.

5.5 実験結果(協調・端末間距離変更)

図 13 にプロキシ端末の RSRP を -94dBm 程度で固定し、通信デマンドを 1.4Mbps にして、プロキシ・クライアント間の距離を 0.5m, 5m, 10m 変えた場合での通信エネルギー効率のグラフを示す。このグラフから

わかるように、プロキシ・クライアント間の距離とエネルギー効率の間にはほとんど相関がないことが読み取れる。これは、今回使用しているスマートフォンの無線 LAN モジュールが通信電力制御を行っていないためだと考えられる。

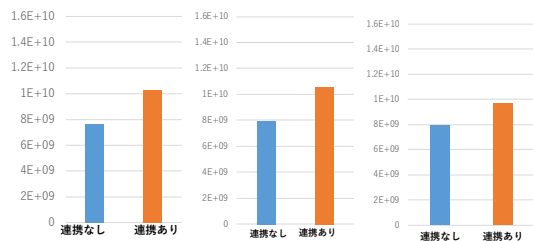


図 13 4 台協調時の RSRP(-95~-94dBm), 通信デマンド (1.4Mbps), 端末間距離(0.5m, 5m, 10m)と通信エネルギー効率の関係

Figure 13 Relation among RSRP(-95~-94dBm), Communication Demand(1.4Mbps), distance (0.5m, 5m, 10m) of terminals and Energy Efficiency with four terminals Cooperation.

5.6 考察

図 9 を見ると、端末が協調せずに個別に通信を行った場合、RSRP が大きいほど、そして通信デマンドが実効スループット上限に近づくほど通信エネルギー効率がよくなっている。これは先の通信電力効率測定実験の結果からもわかるように RSRP が大きい場合は端末側の LTE の送信電力を下げるのが可能なためである。通信デマンドに関しても先の実験から分かるように、RSRP が大きい場合においては通信速度の上昇に対する電力消費の増加割合が非常に少ないことから、実効スループット上限近くで高速に送信することで送信総 bit 量を多くすることにより通信エネルギー効率 bits/J を向上することが出来る。

次に図 10, 11 を見ると、RSRP が大きく、通信デマンドが小さい場合は協調の効果が弱く、一方で RSRP が小さく、かつ通信デマンドが大きい場合や、端末台数が多い場合は、協調により通信エネルギー効率が改善している。これは協調することによって、プロキシ端末以外の端末の LTE 通信モジュールを消費電力が少ない待ち受け状態に出来るからだと考えられる。これらの結果より、以下の条件において協調通信が有効に機能することが分かった。

1. 連携台数 3 台以下：一台でも RSRP が悪い(-80dBm 以下)端末が存在する、もしくは各端末が 2.8Mbps 以上の通信デマンドがある場合。

2. 連携台数 4 台：常に協調通信が有効。
3. プロキシ・クライアント間の距離は通信エネルギー効率にはほとんど影響しない。

6. まとめ

本研究ではモバイル通信端末の省電力化を目的として提案している端末間協調・省電力フレームワークの有効性を検証するため、スマートフォンを用いた実環境において受信電波強度を変化させた場合の総送信ビット量と消費エネルギーの関係を測定した。その結果、(1)端末単体での通信と(2)端末 4 台で協調して通信する場合を比較した場合、最大で 47%の通信エネルギー効率を向上させられることが明らかになった。

本論文では、各端末の通信デマンドは均一かつ、プロキシ端末の達成可能通信上限を超えないように設定されているが、実応用においては通信デマンドの不均一性に加えてプロキシ端末の達成可能通信上限も動的に変化すると考えられる。よって最適プロキシの選択の次の段階として、選択されたプロキシ端末の達成可能通信上限を超えない範囲で通信容量を充足できるデマンドを持つクライアント群を選択、収容するためのクライアント群選択法の検討と実験による検証を行う予定である。また、実際の利用場面を想定した端末群の変動、例えば 4 台の協調端末群が 2 台ごとの端末群に分離した場合やそこから 4 台に再統合した場合でも、プロキシ端末が適切に選択されるようにする検討、およびその場合の通信利用効率の検証も今後の重要な課題である。

文 献

- [1] 服部聖彦, 単麟, 天間克宏, Abolfazl Mehdodniya, 大和田泰伯, 浜口清, 安達文幸, “端末間協調による極省電力・協調型無線機の検討,” 信学技報, vol. 115, no. 437, ASN2015-81, pp. 11-13, 2016 年 1 月.
- [2] 単麟, 服部聖彦, 李選幫, 天間克宏, “無線端末群のための極省電力協調方式の一検討,” 信学会ソサイエティ大会, B-18-12, 2016 年 9 月.
- [3] 村田英一, “マルチユーザ MIMO システムにおけるユーザ端末共同干渉キャンセル,” 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2013-201, pp.159-164, 2013 年 11 月.
- [4] H. Murata, “Collaborative interference cancellation for future wireless communications,” Proc. 2015 Vietnam-Japan International Symposium on Antennas and Propagation, Ho Chi Minh City, Vietnam, pp. 35-38, Jan. 2015.
- [5] 林勇治, 村田英一, “線形及び非線形信号処理を用いた端末共同干渉キャンセルの屋外伝送実験,” 電子情報通信学会論文誌, Vol.J98-B, No.7, 2015 年 7 月.
- [6] A. Radwan and J. Rodriguez, “Energy saving in multi-standard

- mobile terminals through short-range cooperation,” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012 2012:159. DOI: 10.1186/1687-1499-2012-159.
- [7] 小川亮二, 齊藤裕樹, 狐崎直文, 戸辺義人, “複数携帯端末によるエネルギー消費を考慮した協調受信機構の設計,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2014)シンポジウム, 2014 年 7 月.
- [8] T. Rault, A. Bouabdallah, Y. Challal, “Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks: A top-down survey” Elsevier, Computer Networks 67, pp.104-122, 2014.
- [9] G. Smaragdakis, I. Matta, A. Bestavros, “SEP: A Stable Election Protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks”, 2nd International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications (SANPA), no. 4, pp. 660-670, 2004.
- [10] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. sköld, 4G, “LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband”, 2nd ed., Waltham, USA, Academic Press, 2014.
- [11] 総務省 平成 29 年通信利用動向調査の結果, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/statistics05b1.html>

縦 26.4mm
横 20mm

安達 文幸 (正員,)

縦 26.4mm
横 20mm

大和田 泰伯 (正員,)

(平成 XX 年 XX 月 XX 日受付, XX 年 XX 月 XX 日再受付)

縦 26.4mm
横 20mm

服部 聖彦 (正員, 1220519)

2006 年 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 知能システム科学専攻 博士後期課程修了博士(工学). 同年, 情報通信研究機構 研究員. 2008 年 電気通信大学 助教. 2014 年 情報通信研究機構 主任研究員. 2017 年 埼玉工業大学工学部 准教授.
無線メッシュネットワーク, 自律分散システム, 複数ロボット協調システム, IoT の研究に従事. 計測自動制御学会, 電子情報通信学会, 人工知能学会会員.

縦 26.4mm
横 20mm

単 麟 (正員,)

縦 26.4mm
横 20mm

天間 克宏 (正員,)

縦 26.4mm
横 20mm

趙 欧 (正員,)

平 17 中国南京郵電大・理工・電気卒. 平 26 京大大学院情報学研究科修士課程了. 平 28 同大博士後期課程了(情報学). 同年, 情報通信研究機構(NICT)に入所. 現在, 無線伝送方式の研究に従事.

Abstract

Our main aim is to develop and demonstrate energy saving technologies for mobile terminals (MTs) which have multiple wireless interfaces (i.e., LTE and WiMAX interfaces for Wide Area Network (WAN), Wireless LAN and Bluetooth interfaces for Local Area Network (LAN)). We propose cooperative framework to take advantage of the good channel quality of WAN and LAN links to save energy in MTs. In the cooperative framework, how to select proxy MT which connects to the WAN and provides the LAN connection to cooperative MTs is an important issue. We constructed a smartphone test-bed to evaluate and show the energy gains that can be achieved in different channel conditions and number of cooperative MTs. As a result, it shows that up to 47% energy saving can be achieved.

key words: Terminal Cooperation, Power Saving Communication, Communication Energy Efficiency, Autonomous Decentralized Control