

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月30日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760284

研究課題名（和文） 協力マルチホップ伝送を用いた低消費電力無線ネットワークの研究

研究課題名（英文） Power Efficient Wireless Network Using Cooperative Multi-hop Transmissions

研究代表者

石橋 功至（ISHIBASHI KOJI）

静岡大学・工学部・助教

研究者番号：80452176

研究成果の概要（和文）：本研究では、ネットワーク全体として消費電力を低く抑えることができる高効率なマルチホップ伝送方式の設計における様々な理論的枠組みを示し、これらを基に実現可能な低消費電力協力マルチホップ伝送ネットワーク方式を提案した。さらに提案低消費電力マルチホップネットワークをソフトウェア無線機によって実装し、現実的な環境においても協力マルチホップ伝送が高効率な通信を達成することを示した。

研究成果の概要（英文）：In our project, we have provided the theoretical frameworks to design highly efficient multi-hop transmissions which can reduce the total power consumption in the network. Based on these analytical results, we proposed feasible power-efficient cooperative multi-hop communications. Moreover, we have implemented our proposed cooperative multi-hop communications by using software-defined radio (SDR) and shown that our approach can achieve the superior performance in practice.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：情報通信工学、高信頼性ネットワーク、移動体通信

## 1. 研究開始当初の背景

我が国における電波利用は、携帯電話、無線 LAN、PHS、電子タグなど移動通信分野を中心に、民間利用が急速に増大している。ユビキタスネット社会に向けて、この傾向は今後さらに加速化され、電波利用の高度化が期待される。次世代無線通信では、自律分散制御によりネットワークをユーザーの要求に応じて構築することが検討されているが、このような自律分散制御型ネットワークで

は、情報を複数の端末を中継して伝送するマルチホップ伝送方式が有効であることが知られている。しかしマルチホップ伝送では、自身のデータに加え、他ユーザーのデータを中継するために各無線端末における負荷が増大し、結果的にネットワークの寿命を縮めてしまうことが指摘されている。

ネットワーク全体として消費電力を低く抑えることのできる、より高効率なマルチホップ伝送を設計するためには、消費電力を考

慮した通信ネットワークに関する議論が必要である。これらの議論は特にセンサーネットワークを中心に議論が行われており、中でも通信理論的な解析では UCLA の Pottie 教授らのグループの研究や、ハーバード大学の Tarokh 教授のグループの研究が挙げられる。とりわけ米国スタンフォード大学の Goldsmith 教授の研究チームは、誤り訂正符号や変調方式がアナログ・デジタル回路両側面の消費電力に与える影響を考慮してネットワークの解析を行っている点でも興味深い。国内でも消費電力の観点からネットワークの高効率化を目指した研究は検討されており、横浜国立大学や、京都大学等が中心になり、活発に成果をあげている。しかしながら、消費電力に着目したマルチホップ通信（もしくは協力通信）に関する一連の研究の多くは、物理層もしくは上位層のどちらか一方のみに主眼をおいており、増幅器効率や送信信号の干渉、端末間の同期など実装上の多くの問題を考慮にいていない。また、協力通信をマルチホップ伝送に適用して検討した例は非常に少なく、具体的なプロトコル設計や、消費電力まで含めて議論をした例は非常に少ない。

## 2. 研究の目的

本研究では、ネットワーク全体として消費電力を低く抑えることができる高効率なマルチホップ伝送方式の設計において有効な理論的枠組みを与え、早期に実現可能な低消費電力協力マルチホップ伝送ネットワーク方式を提案する。さらに提案低消費電力マルチホップネットワークを USRP2 および GNU Radio を用いて実装し、理論上では理想化されている様々なパラメータの影響についても解析を行う。

## 3. 研究の方法

前章で述べた研究目的を達成するために、本研究課題では以下の3つのフェーズで研究を実施する。(1)まず既存のマルチホップ伝送システムの問題を明らかにするために図1に示す ZigBee 評価キットを用いて従来型マルチホップ伝送を実装し、公園や温室、建物内など様々な実環境にて、特性評価を行う。(2)実測実験の結果より得られた知見をもとに、既存の理論を拡張し、協力マルチホップ伝送の設計について様々な観点から議論し、新たな協力マルチホップ伝送方式を提案する。(3)さらに提案協力マルチホップ伝送をソフトウェア無線機である USRP2 および GNU Radio (図2)を用いて実装し、実環境においても協力マルチホップ伝送が有効であることを示す。またフェーズ3において得られた知見を用いて、2)の理論を拡張し、従来研究において考慮されてこなかった様々なパラメータを考慮した新しい設計法についても提案を行う。

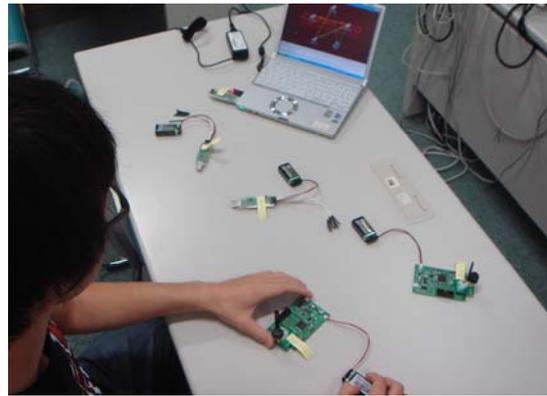


図1: ZigBee 評価キットによる開発風景



図2: ソフトウェア無線機 USRP2

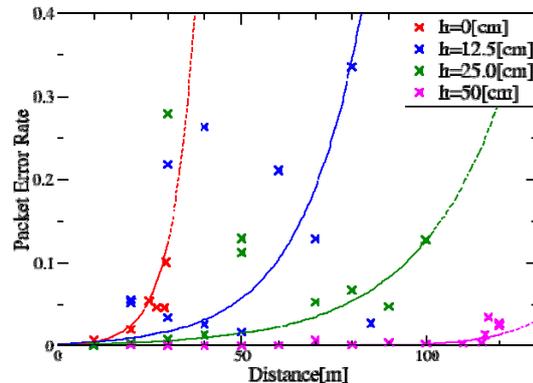


図3: 自由空間における PER 特性

## 4. 研究成果

### (1) 従来型マルチホップ伝送方式の実環境における特性評価

実環境における通信路の計測を行うため、IEEE802.15.4 センサノードとして ZigBee 評価端末を用いて計測システムの開発を行った。特に複数端末間におけるパケット誤り率 (PER: Packet Error Rate) および RSSI を同時に測定できるようにシステム開発を行った。開発したシステムを用いて、実環境における計測を行った。計測モデルとして、自由空間モデルと実環境モデルの2パターン用い、自由空間モデルとして静岡大学浜松キャンパス近くにある和地山公園を、実環境モデルとして静岡県農林技術研究所のメロン栽培

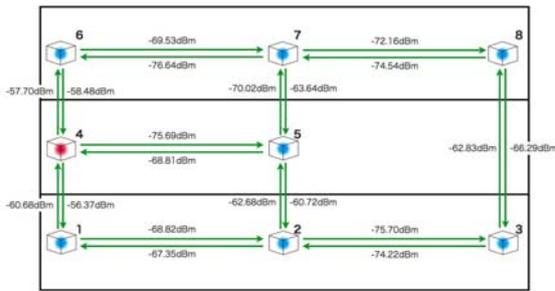


図 4 : 高さ 150cm における各リンクの RSSI 値

温室をそれぞれ用いて実測した。自由空間における伝搬測定の結果、アンテナ高が十分に確保できる場合にはその RSSI 値は、フリスの公式から得られる結果に近いものとなった。しかし、アンテナ高が低い場合には距離に対する減衰が著しい結果となった。これは地面による反射波が大きく影響しているものと思われる。図 3 に自由空間における PER 測定結果を示す。図における  $h$  は送受信端末それぞれの高さを示している。高度が上昇するに従い、低い PER を維持できる距離が増加していることがわかる。

次に、実環境モデルにおける測定結果を示す。温室は温度約 25 度、湿度 90% と非常に高温多湿の環境である。図 4 に各リンクにおける受信 RSSI 値を示す。ここで各端末の高さは 150cm とした。ZigBee では規格上 -85dBm が最低受信感度と規定されており、ここから望ましい受信 RSSI 値は -82dBm 程度と考えられる。図 5 より各リンクの受信電力はほぼ -82dBm を上回っており、端末の高さが十分にあれば、問題なく通信を行えることが分かる。一方、端末 4-6 間、3-8 間に比べて 5-7 間の受信電力が 10dB ほど低下していることが分かる。これは、端末の間にメロン棚が存在しており、植物の葉やメロンの水分によって著しく減衰を受けたためと考えられる。このため、長距離に渡ってデータ収集を行う場合には、複数のメロン棚や壁を通過して通信する必要性が考えられ、特性の著しい劣化が想定される。また長期間の観測により、時間変動についても検討した。温室内では、温室度調整のために温室に風があり、また定期的に温室の屋根が開くことにより、時間的な変動が少量 (1dBm-5dBm 程度) 確認された。以上より、遠い距離や見通し外にあるセンサから情報を収集する場合には、マルチホップ通信、協力通信、もしくはその併用が必要不可欠であると考えられる。

次に多数の送信端末からマルチホップ中継を介してセンシングデータを収集した場合、ネットワーク全体の寿命がどのように変化するかについて検討した。実験は同様に静岡県農林技術研究所のメロン栽培温室で行った。各端末は 9V 乾電池 1 個で駆動し、実験

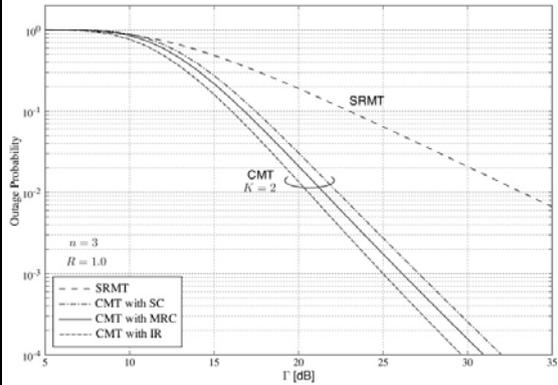


図 5 : アウテージ確率特性

時間の都合上スリープは設定可能な最小値とし、30 秒ごとにセンシング情報 (温度および湿度) を送信した。その結果、直接通信によるネットワーク寿命は平均 362 分、マルチホップ通信による平均ネットワーク寿命は平均 301 分となった。マルチホップ通信時、ZigBee では中継端末はスリープに入ることが許されず、常に受信回路を動作させておく必要がある。このため待機電力で消費される電力によって消費電力が増大し、中継端末そのものがボトルネックとなってネットワーク全体の寿命を縮めてしまうことになった。一方で通信の安定性そのものは直接通信と比べ格段に向上しており、マルチホップ伝送時にはパケットロスがほぼ発生しなかった。しかしセンシング情報を送信する端末数を増やしていった場合、急激にパケットロスが増大した。これは衝突および中継端末における輻輳の発生が原因と考えられる。

#### (2) 高効率な協力マルチホップ伝送の設計

上述の実験結果より、実際のネットワークでは周囲の環境の影響により端末の通信可能距離が著しく低下することが明らかとなった。また他者のデータを転送する際に特定の端末の負荷が増大し、ネットワーク全体の寿命が短くなってしまいう問題が明らかになった。そこで協力通信をマルチホップ技術に適用することでネットワーク全体に負荷を分配することを考える。まず協力マルチホップ通信についてアウテージ確率の観点から解析を行い、その効果と設計について検討した。図 5 に理論解析によって求めた様々な協力通信方法を併用した場合のアウテージ確率を示す。ホップ数は 3、伝送レートは 1 [bps: bit per symbol] であり、図中におけるパラメータ  $\Gamma$  は協力通信を用いない場合の各端末間における平均受信 SNR である。用いた協力通信方式は、選択合成 (SC)、最大比合成 (MRC)、並列符号化 (IR) の 3 種類であり、この順に送信・協力・受信の各端末における複雑度が増加する。図の結果より、IR が最もすぐれた性能を示しており、SC 方式と比較して 2dB 程度の利得を得ていることが分かる。

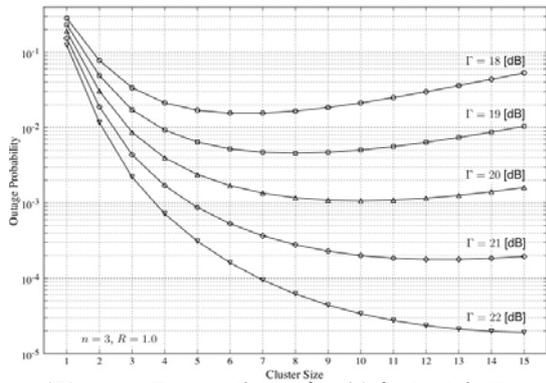


図 6: クラスタサイズに対するアウトージ確率の変化

また MRC 方式は SC 方式と IR 方式の中間程度の特性を示しており、複雑度と最終的な全体の特性にトレードオフ関係があることが見てとれる。図 6 にはクラスタの構成が性能に与える影響について解析した結果を示す。ここでネットワークにおける送信電力は常に一定であるものとし、クラスタ内の端末数が増加すればその分だけ各端末における消費電力は低下するものと仮定する。また協力通信方式としては、もっとも簡単な SC 方式を仮定しており、ホップ数、伝送レートはさきほどと同様にそれぞれ 3 ホップ、1bps とする。図より SNR が 20dB 以下の場合、アウトージ確率の観点でみて最適なクラスタサイズが存在することが分かる。これは通信路における誤りとして雑音の影響を無視できないためである。クラスタサイズを大きくした場合、端末あたりの消費電力が下がる代償として 1 端末間における送信電力が低下し、結果として受信 SNR が低下する。このため雑音耐性が低下し、誤りが発生する。一方で SNR が十分に高い場合には雑音による影響が十分小さく、フェージングへの耐性を向上させることだけが重要となる。よって SNR の高い領域ではクラスタサイズを大きくすることによって常に特性が改善している。しかしあまりに大きくしすぎた場合、再び雑音の影響が無視できなくなるため、クラスタサイズを選択を適切に制御することが必要ということが理解できる。

ここまでの議論でマルチホップ通信や協力通信を単体で利用するのみでなく、これらを組み合わせた協力マルチホップ通信技術の導入が有効であるとの感触を得た。しかしこれらの技術を実装する際に問題となるのが MAC 層の設計である。従来 MAC 層は 1 対 1 の通信を保証するように設計されており、多対 1 の通信である協力通信においてこれを適用すると帯域利用効率および電力利用効率を著しく損なう可能性がある。そこで我々は、物理層および MAC 層の両者を考慮した動的符号化協力通信方式を新たに提案した。動的符号化協力通信は、協力端末および宛先

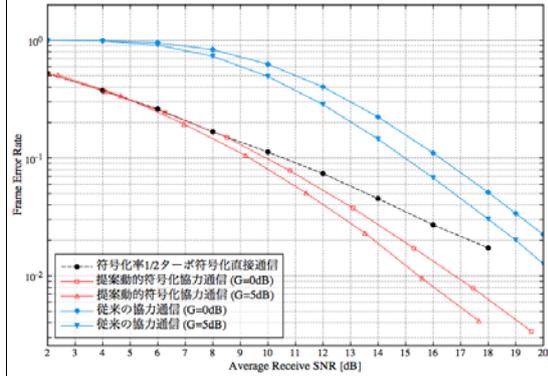


図 7: 提案方式のフレーム誤り率特性

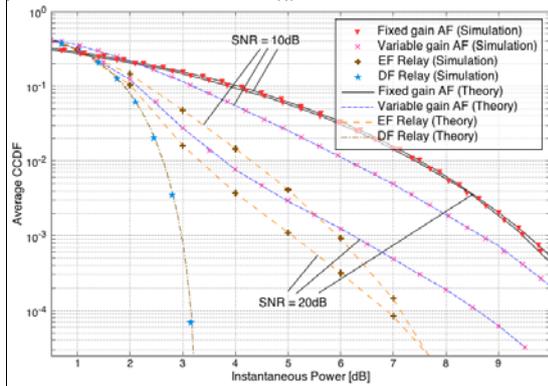


図 8: 各種協力通信方式の送信信号瞬時電力分布

端末が通信状況を自律的に認識することで、帯域利用効率を損なうことなく動的に協力通信を実現する方法である。さらにこの方式では送信端末の通信中に協力端末が信号を重畳して（空間的に）情報を再送するため、帯域利用効率を損ねず、他ユーザーの通信機会を低下させない。図 7 に符号化率 1/2 のターボ符号を用いた直接通信、従来型協力通信、提案動的符号化協力通信のフレーム誤り率特性をそれぞれ示す。（図中における変数  $G$  は送信・協力端末間における距離利得である。）いずれの方式も帯域利用効率は等しい、つまり協力通信のために新たな周波数帯域の割り当ては行っていない。図 7 の結果より、協力端末の幾何学的な位置関係に関わらず、提案方式が従来方式に比べて 5dB 以上の高い利得を得ていることが確認できる。

各協力端末からの送信信号に着目すると、ここまでの議論では一貫して協力通信端末において受信した信号を一度復元し、再生成して送信する方式を仮定していたが、協力端末において単純な増幅のみを用いることで省電力を達成する増幅転送 (AF: Amplify-and-forward) 型協力通信が活発に検討されている。この方式は転送時にかかる端末処理が少なくすむ一方、増幅後の信号に含まれる雑音信号成分まで増幅・転送するため、送信信号のダイナミックレンジが大きくなり、アンプにおける電力利用効率を低下

させることが指摘されてきた。そこで AF 型協力通信を含む、様々な協力通信方式の瞬時電力分布を解析し、アンプの増幅効率の観点からみて実用的な協力通信方式を明らかにした。図 8 に解析結果の一例を示す。比較対象として受信値に固定の増幅利得を与える固定利得 AF (Fixed Gain AF)、送信端末と協力端末間の通信路応答によって増幅利得を変更する可変利得 (Variable Gain) AF、双曲線正接関数を用いて送信信号の振幅に制限を与える推定転送型 (EF: Estimate-and-Forward)、受信値を復元し、再生する復号・転送型 (DF: Decode-and-Forward) の 4 種を想定した。図は横軸が送信信号の瞬時電力を縦軸がその発生確率を表している。AF, EF はいずれの場合においても中継局の SNR に強く影響されており、特に最も簡易な中継技術として検討されている Fixed Gain AF は雑音が十分に低下する領域においても高い瞬時電力を示しており、中継局が簡易になる一方で、アンプの増幅効率を著しく低下させることがわかる。Variable Gain AF および EF においても SNR が 20dB に達しても、高い確率で高い瞬時電力を含んでおり、いずれの方式においてもアンプの効率を考慮すると省電力効果は期待できないと考えられる。よって、アンプの増幅効率の観点からみて中継局において信号の復調・再生は必須であり、協力マルチホップ通信を実用化するには DF 型協力通信を用いることが望ましいことが理論的に明らかにした。

### (3) USRP2 および GNU Radio を用いた実装と評価

これまでの研究結果をもとに、物理層および MAC 層を含む全てのレイヤを開発可能な GNU Radio を用いて実装し、ソフトウェア無線機 USRP2 を用いて協力マルチホップ通信の評価を行った。実装においては 4 つの送信端末と 3 つの中継端末、1 つの受信端末で構成されるネットワークを仮定し、各端末はそれぞれ 1 本の送受信アンテナを用いて、半二重モードで通信を行うものとした。フェーズ 1 において、4 つの送信端末は情報パケットをそれぞれ順番にブロードキャストする。3 つの中継端末はブロードキャストされた情報パケットを受信し、誤り検出を行い、正しく受信されたパケットを保持する。このとき形成されたネットワークトポロジを各中継端末は動的に認識し、それを誤り訂正符号のグラフ構造と見なすことで、ネットワーク協力符号化を実現する。また実装の都合上、ネットワーク誤り訂正符号として簡易な (7, 4) ハミング符号を仮定した。フェーズ 2 では、各中継端末が合成したパケットをそれぞれ宛先端末に送信し、宛先端末ではそれらを効果的に用いて復号処理を行う。



図 9: USRP2 による実験風景

表 1: 実験諸元

送信周波数	5.1 [GHz]	アンテナ間距離	1.1 [m]
IF周波数	100 [MHz]	データ長	100 [Byte]
インターポレーション/デシメーション	64	シンボルレート	100 [Kbps]
誤り検出	CRC32	FIRフィルタ	RRC ( $\alpha = 0.35$ )
変復調方式	QPSK変調/ 遅延検波	送受信アンテナ	無指向性アンテナ (利得3[dBi])
アクセスコード長	8 [Byte]		

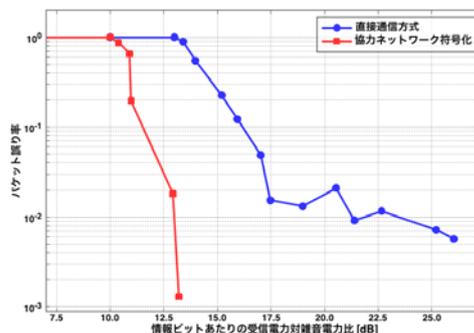


図 10: パケット誤り率特性

図 9 に実際の実験風景を示す。端末数および実験免許の都合上、送信端末、中継端末をそれぞれ 1 台ずつとし、繰り返しパケットを送信することで仮想的に 7 台の端末を動作させている。また表 1 に各種実験諸元を示す。

図 10 に実験より得られたパケット誤り率特性の結果を示す。実験では宛先端末において周期的に送信器からのパケットを強制的に廃棄することで、仮想的な時間変動通信路を実現している。図 10 より直接通信方式が 1% の誤り率で収束しているのに対して、実装した協力ネットワーク符号化方式は安定した通信特性を維持できていることが分かる。よって実環境においても協力通信は十分に効果的であり、これまでの一対一通信 (直接通信) と比較して、大幅な高信頼性が達成可能であることが確認できた。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① K. Ishibashi and H. Ochiai “Analysis of Instantaneous Power Distributions for

- Non-Regenerative and Regenerative Relaying Signals,” IEEE Trans. on Wireless Commun., vol.11, no. 1, pp. 258-265, (2012.1), 査読有
- ② W.-Y. Shin and K. Ishibashi, “Regional Diversity-Multiplexing Tradeoff,” IEICE Trans. Commun., vol.E94-B, no.10, pp. 2868-2871, (2011.10), 査読有
- ③ K. Ishibashi, K. Ishii, and H. Ochiai, “Dynamic Coded Cooperation using Multiple Turbo Codes in Wireless Relay Networks,” IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 5, no. 1, 197-207, (2011.2), 査読有  
[学会発表] (計17件)
- ① K. Ishibashi, W.-Y. Shin, H. S. Yi, and H. Ochiai, “A Peak Power Efficient Cooperative Diversity Using Star-QAM,” in Proc. of IEEE BWA Workshop with IEEE GLOBECOM 2011, Houston, TX, (2011.12.9)
- ② S. Kim, W.-Y. Shin, and K. Ishibashi, “The Gaussian Two-Way Relay Channel with Wire tapper,” in Proc. of Asilomar Conf. on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, CA, (2011.11.9)
- ③ T. Kobayashi, K. Ishibashi, and T. Wada, “A Study on Outage Probability of Collaborative Multi-Hop Transmissions with Non-Uniformly Distributed Networks,” in Proc. of IEEE PIMRC 2011, Toronto, Canada, (2011.9.13)
- ④ 小林俊貴, 石橋功至, 和田忠浩, “仲上-ライスフェーディング環境下における協力マルチホップ伝送の通信性能に関する一検討,” 信学技報, RCS2011-96, pp.129-134, 旭川市市民会館 (2011.7.22)
- ⑤ 堀部智史, 石橋功至, 和田忠浩, 椋本介士, “GNU Radio/USRP2 を用いたネットワーク誤り訂正符号の実装に関する一検討,” 信学技報, RCS2011-71, pp. 209-214, 琉球大学 (2011.6.24)
- ⑥ K. Ishibashi and H. Ochiai, “Performance Analysis of Amplify and Forward Cooperation over Peak-Power Limited Channels,” in Proc. of IEEE ICC 2011, Kyoto, Japan, (2011.6.7)
- ⑦ 小林俊貴, 石橋功至, 和田忠浩, “仲上-ライスフェーディング環境下における不均一分布ネットワーク協力マルチホップ伝送のアウトージ確率に関する一検討,” 電子情報通信学会 2011 総合大会, B-5-149, 東京, (2011.3.17)
- ⑧ 堀部智史, 石橋功至, 和田忠浩, 椋本介士, “GNU Radio/USRP2 を用いたネットワーク誤り訂正符号の実装に関する一検討,” 電子情報通信学会 2011 総合大会, B-5-51, 東京, (2011.3.14)
- ⑨ C. Cheng, K. Ishibashi, and T. Wada, “Power-Efficient Network Coded Cooperation using Non-binarily Modulated Relay,” in Proc. of IEEE RWS 2011, Phoenix, AZ, (2011.1.17)
- ⑩ 小林俊貴, 石橋功至, 和田忠浩, “仲上-ライスフェーディング環境下における協力マルチホップ伝送のアウトージ確率に関する一検討,” 第33回情報理論とその応用学会 (SITA2010), 長野県長野市 信州松代ロイヤルホテル, (2010.12.3)
- ⑪ 小林俊貴, 石橋功至, 和田忠浩, “不均一分布ネットワークにおける協力マルチホップ伝送のアウトージ確率に関する一検討,” 信学技報, RCS2010-67, pp.113-118, 網走市民会館, (2010.7.16)
- ⑫ 石橋功至, 落合秀樹, “Amplify-and-Forward 型協力リレー信号の瞬時電力分布に関する一検討,” 信学技報, RCS2010-68, pp.119-123, 網走市民会館, (2010.7.16)
- ⑬ 石橋功至, 落合秀樹, “ピーク電力制限下における Amplify-and-Forward 型協力通信の特性に関する一検討,” 信学技報, RCS2010-46, pp.167-172, 京都大学, (2010.6.18)
- ⑭ C. Cheng, K. Ishibashi and T. Wada, “Coded Cooperation using Non-binary Modulation,” 信学技報, RCS2009-298, pp.233-238, 横須賀リサーチパーク (YRP), (2010.3.4)
- ⑮ C. Cheng, K. Ishibashi and T. Wada, “A Study of Coded Cooperation using TPSK,” 電子情報通信学会 2010 総合大会, B-8-22, 東北大学, 仙台, (2010.3.16)
- ⑯ N. Naoki, K. Ishibashi, T. Wada, “Theoretical Analysis of Collaborative Multi-Hop Transmission over Block Rayleigh Fading Channels,” 信学技報, IT2009-60, pp.47-52, ハワイ大学, (2010.1.8)
- ⑰ 西村直記, 石橋功至, 和田忠浩, “ブロックレイリーフェーディング環境下における協力マルチホップ伝送に関する一検討,” 第32回情報理論とその応用学会シンポジウム (SITA 2009), 湯田温泉, 山口, (2009.12.3)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石橋 功至 (KOJI ISHIBASHI)

静岡大学・工学部・助教

研究者番号: 80452176