

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760295

研究課題名(和文) 高信頼性・超寿命を達成する高度自律分散無線ネットワーク技術に関する研究

研究課題名(英文) On highly-green and ultimately-reliable ubiquitous wireless sensor networks

研究代表者

石橋 功至 (Koji, Ishibashi)

電気通信大学・学内共同利用施設等・准教授

研究者番号：80452176

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題ではノード間の協力通信をベースとし、物理層からMAC層までのクロスレイヤ設計により、数十年単位で膨大な観測データを効率よく長期間取得できる、低消費電力かつ信頼性の高いユビキタスセンサネットワークの実現のための基礎理論の構築を目的として実施した。具体的には増幅器における電力利用効率を改善する新たな協調方式や、複数端末によって分散的に誤り訂正符号化を行う新たな方式を提案した。さらに他者の電力を回収して再利用することによって無電源で協力通信を実現するエナジーハーベスティング協調通信を提案した。これらの成果によって半永久的に駆動可能なセンサネットワークが理論上可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we studied fundamental communication theory to realize highly-green and ultimately-reliable ubiquitous wireless sensor networks based on a cross-layer design between physical layer and medium access control (MAC) layer. Specifically, we have proposed a new cooperative communication which enhances the power efficiency at the high power amplifier of the cooperative node. Moreover, two distributed coding techniques have been investigated which can achieve the theoretical limit. Finally, energy harvesting cooperative communications have been proposed. In this cooperation, the cooperative node can scavenge the energy from RF signals emitted by the others and it can be significantly reduces the total energy consumption of the network. These technologies would be key-enablers of the sensor network.

研究分野：通信理論

キーワード：省電力化 無線分散ネットワーク 協調通信 ネットワーク符号化 RFエナジーハーベスティング 符
号化協調 無線通信

1. 研究開始当初の背景

2011年3月に発生した東日本大震災により、自然災害の事前予測の重要性が指摘されていた。地震などの自然災害の事前予測には、数十年単位で広範囲にわたる定点観測によって得られた統計データが必要であるとされる。このような要求に応えるためには、膨大な観測データを効率よく長期間にわたり取得できる、省電力かつ信頼性の高い無線センサネットワークの実現が不可欠である。

無線センサネットワークの代表的な標準規格としては ZigBee が広く知られている。これは Bluetooth や IEEE802.11 などと比較して、最大伝送レートは 250kbit/s と非常に低速であるが、それと引き替えに低消費電力および低コストを実現している。しかしながらその寿命は数年程度とされており、これは大規模な環境センシングを実現するためには十分とは言えない。また ZigBee における低消費電力の方法として、各ノードの情報を中継させる(マルチホップさせる)ことにより送信電力の低減を行っているが、本質的にはノードのスリープモードや電源 OFF などの制御で消費電力を抑えているだけであり、MAC(Medium Access Control)層および物理層のトータルの低消費電力化の検討や実装は十分になされているとは言えず、今後の研究開発が必要不可欠な状況であった。

2. 研究の目的

本研究課題では、ノード間の協力通信をベースとし、物理層から MAC 層までのクロスレイヤ設計により、数十年単位で膨大な観測データを効率よく長期間にわたり取得できる、低消費電力かつ信頼性の高いユビキタスセンサネットワーク実現のための基礎理論の構築を目的とする。具体的には、まずソフトウェア無線機 USRP2 を用いて、種々の協力通信方式を実装し、評価することで従来の理論で無視されてきた様々なパラメータの影響を調べ、それらを取り込んだ新たな数学モデルや解析法の提案を行う。またそれらの理論をベースとして、既存の無線通信方式に比べ数十倍の超寿命と高信頼性を実現する無線ネットワークの設計を試み、無線ユビキタスセンサネットワーク実現に目処をたてるのみならず、クロスレイヤ設計による新たな無線通信設計の枠組みを示すことを目標とする。

3. 研究の方法

前章で述べた目的を達成するために、本研究課題では以下の4つのワークパッケージで研究を実施した。(1)ソフトウェア無線 USRP2 を用いて協力通信方式の実装を行い、実環境における誤り率特性、省電力効果に関する評価を行う。これらの評価結果を踏まえて(2)帯域利用効率と電力利用効率のトレードオフを解析し、電力利用効率に優れた協力通信方式を提案する。(3)物理層と上位層との連

携によってシステム全体の高信頼・省電力化を目指す。(4)空間中に存在する自然エネルギーを電力して回収し、利用するエナジーハーベスティング技術のうち、特に通信中の電波を回収し、再利用する無線周波数(RF: Radio Frequency)エナジーハーベスティング技術に着目し、無電源で協力通信を実現する RF エナジーハーベスティング協調通信を提案する。

4. 研究成果

(1) USRP2 を用いた協力通信の実環境評価

まず物理層からの全てのレイヤを開発可能な GNU Radio を用いて協力通信を実装し、その評価を行った。送信周波数は 5.1GHz、中間周波数 100MHz、シンボルレートは 100kbps である。また変調方式は送信端末、協力端末共に QPSK 変調を用い、検波方式は遅延検波を用いた。今回の実装では、協調方式として受信した情報を復調・復号し、正しく受信できた場合に限り協力通信を行う復号・協調(DF: Decode-and-Forward)方式とした。誤りの検出には CRC32 を用いた。

実験の結果、協力通信では高信頼化が達成できる一方、中継端末が復調・復号の上、さらに転送を行うため、システム全体としては電力使用量が増加し、期待通りの省電力化が実現できるとは限らないことが明らかになった。特にネットワーク内に通信状況の悪い端末が存在する場合、この端末の通信を補助するために他の多くの端末が協力通信を行う必要がある。よって協力端末の省電力化および多数の端末の協力によって端末あたりの消費電力を抑圧することなどが需要であると考えられる。

(2) 電力利用効率に優れた協力通信方式

非再生型協調通信の一種である AF 型協調通信は、受信情報を復調・復号・再生する DF 型協調通信のような再生型協調通信と異なり、受信信号を単純に増幅・転送することで空間ダイバーシティ利得を獲得するため、大幅にリレー端末における回路規模を低減できる特徴がある。リレー端末(他ユーザー)における負荷は各端末の寿命、ひいてはネットワーク全体の寿命を決めるため、リレー端末への負荷を軽減しつつ、高信頼性という要求を実現可能な AF 型協調通信は非常に魅力的な技術であり、活発に研究が進められている。しかしワークパッケージ(1)において示したように AF 型協調通信では、一般に無線通信における受信信号はフェーディングや雑音の影響によって高い瞬時電力と広いダイナミックレンジを持っている。このため、受信信号を単純に線形増幅し、転送しようとするれば、その送信信号は非常に高いピーク電力と広いダイナミックレンジを持つこととなる。電力増幅器(PA: Power Amplifier)は、入力信号電力が飽和領域に近づくに従って非線形特性を示し、一度非線形増幅が発生すれば、帯域内および帯域外において、シンボ

ル間干渉といった問題を引き起こす。このような非線形増幅を避ける方法として、入力バックオフ(IBO: Input BackOff)を大きくとることが考えられるが、大きな入力バックオフはPAにおける電力利用効率を著しく劣化させ、結果的にリレー端末における消費電力を増大させる。信号を再生し、ダイナミックレンジを抑圧しつつ、端末への負荷を低減する手法として、リレーが復調のみを行い、信号を再生する Detect-and-Forward (DetF)型協調通信が挙げられる。しかし送信端末が用いる変調方式として Quadrature Amplitude Modulation(QAM)変調のような多値変調を用いた場合には、信号を再生したとしても送信信号は依然として広いダイナミックレンジを持つため、中継端末にかかる負荷は無視できない。そこで我々はビットインターリーブ符号化星形直交振幅変調(star-QAM: star Quadrature Amplitude Modulation)を用いた簡易で電力利用効率に優れた新たな協調ダイバーシティ方式を提案した。Star-QAM方式は複数の位相シフトキーイング(PSK: Phase Shift Keying)変調が同心円上に並んだ構造を持つ変調方式である。提案協調方式ではこの構造を利用し、リレー端末が受信した信号に対してハードリミタを用いることで中継信号を等価的なPSK変調信号に変換する。提案方式の演算量はDetF型協調通信よりも低く、AF型協調通信と同等である。またAF型協調通信では送信信号の電力制約を満たすために、リレー端末において通信路状態情報(CSI: Channel State Information)の振幅変動を追従する必要があるが、本提案方式ではこれも必要ない。

信号の変動によるIBOの差による受信電力の変化を考慮したAF、DetF、提案方式の各BER特性を図1に示す。ここで送信・リレー間のSNRは20dBと仮定した。PAにおける電力利用効率を考慮することで、提案方式は他のどの方式よりも優れたBER特性を示すことが分かる。これはリレー端末においてハードリミタを施すことで、高い瞬時電力の発生が抑圧されたためである。BER=10⁻³において、提案方式はAFに比べて2.4dB、DetFに比べて0.4dBの利得が得られる。以上より、提案協調方式によって中継器の電力利用効率の向上、ひいてはバッテリーの消費量を抑えながら、高信頼な通信が実現できることが示された。

(3) 物理層と上位層との連携による分散符号化協調通信システム

複数端末が互いの情報を共有し、ネットワーク上で誤り訂正符号化を行う手法の一つとして、適応ネットワーク符号化協調(ANCC: Adaptive Network Coded Cooperation)が提案されている。ANCCの通信プロトコルは、無線通信の同報性を利用して各端末が自身の情報 packets を時分割でブロードキャストすることにより端末間で情報 packets を共有するブロードキャストフェーズと、共有し

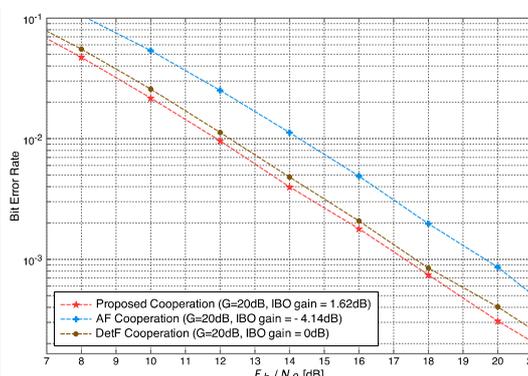


図1：提案方式、AF協調、DetF協調のビット誤り率

た情報 packets を符号化することでパリティ packets を生成し、各端末が時分割で宛先端末へパリティ packets を送信するリレーフェーズの2つのフェーズから構成される。各端末におけるパリティ packets の生成は、その端末が受信した packets、及び自身の packets からランダムに複数の packets を選択し、それらの排他的論理和を計算することで行われる。宛先端末では、2つのフェーズにおいて受信された情報 packets とパリティ packets を用いて情報の復号を行う。ANCCでは、送信端末によって構成されるネットワークポロジを用いて符号を構成しており、各端末がそれぞれ符号語を送信することで、各符号語が空間的に異なる通信路を伝搬し、非常に大きな空間ダイバーシティ利得を得ることができる。しかし、ANCCでは2つのフェーズを使って通信を行うため、半2重通信の仮定の下では、ANCCを行わない場合と比較して帯域利用効率が半減してしまうという問題がある。この問題を解決するため、多値変調を用い、情報シンボルと一つ前の伝送ブロックの情報シンボルに対応するパリティシンボルを同時に伝送する、重畳型適応ネットワーク符号化協調(SANCC: Superimposed Adaptive Network Coded Cooperation)を提案した。本提案方式では、各端末の情報共有とパリティ packets の送信を一度の送信で行うことで、帯域利用効率の半減を回避している。また、情報シンボルとパリティシンボルを同時に伝送するためのマッピング法をして、信号点の前半に情報シンボル、後半にパリティシンボルをそれぞれ配置した重畳(SI: Super Imposed)マッピングを提案した。SANCCでは、通常のANCCと異なり、前後の伝送ブロックの符号語が重畳されているため、各符号語が互いに独立ではない。そのため、最適な復号を行うためには、全ての伝送ブロックで受信されたシンボルを用いて復号計算を行う必要がある。しかし、伝送ブロック数が大きい場合には、復号遅延や packets を格納するメモリ量の観点から、全ての伝送ブロックでのシンボルを用いることは現実的ではない。そこで、一定数毎に伝送ブロックを区切ったものをウィンドウとし、ウィンドウ単位で復号計算を行うスライディングウ

ウィンドウ復号を提案した。これは、ウィンドウ復号と同様に伝送ブロックをウィンドウで分割して復号計算を行い、ウィンドウサイズよりも小さい量だけウィンドウを移動することで、以前のウィンドウにおける確率情報を利用して復号を行う手法である。ウィンドウ内の伝送ブロックのみを計算に用いるため、復号遅延も大きくならず、メモリ量の問題も解決できる。

SANCC の復号性能を、EXIT (Extrinsic Information Transfer)チャートを用いて解析した。EXIT チャートは、BP 法の解析法として用いられる密度発展法を単純化したものであり、復号計算に用いられる対数外部値比と符号語との相互情報量をメッセージとして交換しあうことで解析を行う。SANCC においては、復調器及び復号器での相互情報量の発展が、それぞれ EXIT チャートを用いて解析される。情報1ビットあたりの受信信号対雑音電力比が 5dB である AWGN 通信路における軟値復調器の EXIT チャートを図 2(a)、(b)に、軟値復号器のEXITチャートを図2(c)、(d)に示す。復調器では復号器から得られる相互情報量が増加することによって、より大きな相互情報量を得られていることが分かる。一方復号器では復調器から与えられる相互情報量がある値を超えたところで急激に出力される相互情報量が増大していることが分かる。よって変調を適切に設計することが重要であることが分かる。

計算機シミュレーションから、16-QAM を用いた SANCC のビット誤り率(BER: Bit Error Rate)特性を評価した。図 3 に、スライディングウィンドウ復号を用いた SANCC の BER 特性を示す。図中には、グレイマッピング(隣り合う信号点のハミング距離が1になるマッピング法)、SI マッピング、MSEW (Maximum Squared Euclidean Weight)マッピング(ハミング距離が1となるビット同士の2乗ユークリッド距離を最大にするマッピング法)を用いた場合の特性が比較されている。同図より、SI マッピングではより早い段階でウォーターフォール領域が生じ、MSEW マッピングを用いることで、より低いエラーフロアを達成できることが確認できる。これは、軟値復調器における事前情報が増加することで、出力される対数外部値比が増加し、復号性能が向上したことによるものである。

SANCC を用いた符号化協調ではネットワーク上の互いの構造を利用することで高い符号化利得とダイバーシティ利得が得られることが分かった。よって協調通信を行った場合には端末1台あたりの送信電力を削減することが可能であり、省電力に繋がる。しかし SANCC で構成される符号は本質的に低密度生成行列 (LDGM: Low-Density Generator Matrix)符号と等価であり、その符号化利得はパリティチェック行列の持つ対角成分によって制限されてしまうことが知られている。そこで最終年度では、符号化利得のさら

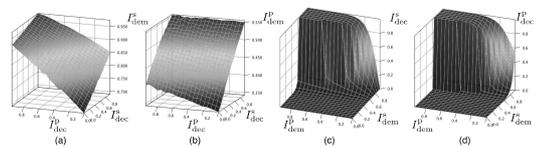


図 2: (a), (b) 軟値復調器及び (c), (d) 軟値復号器の 3 次元 EXIT チャート

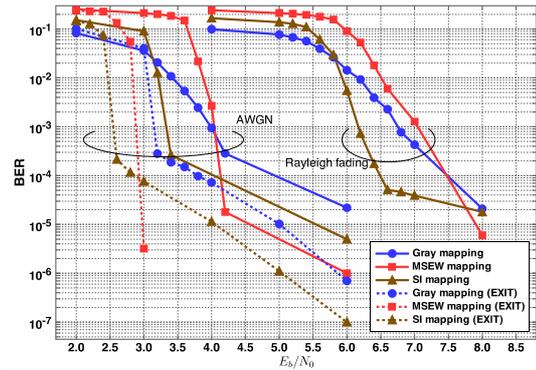


図 3: スライディングウィンドウ復号を用いた SANCC の BER 特性

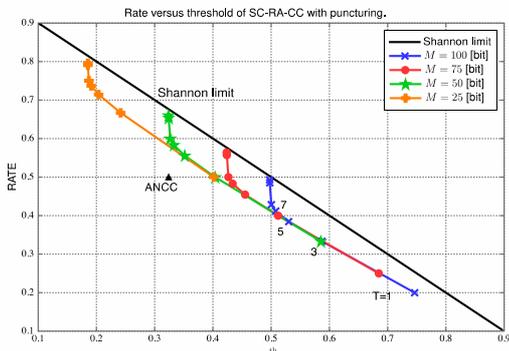


図 4: SC-RA-CC の符号化率と復号閾値

なる改善手法として空間結合 Repeat-Accumulate 符号に基づく符号化協調方式 (SC-RA-CC: Spatially Coupled Repeat-Accumulate Coded Cooperation)を提案した。この手法の特性を図 4 に示す。図よりいずれの符号化率においても通信路容量に漸近するすぐれた特性を示していることが分かる。

(4) 外部電源なしに高信頼の通信を実現する RF エナジーハーベスティング協調通信

ワークパッケージ(2)(3)で示したような電力効率に優れた協力通信方式により、エネルギー利用効率の向上は実現できるが、未だにリレー端末は他者の通信品質を向上させるために自身のバッテリーを消費してしまう。この付加的なバッテリー消費により、ネットワークを構成する複数のセンサが同時にバッテリー切れを起こした場合、ネットワークそのものの維持が困難となってしまう。この問題への解決策として、エネルギーハーベスティング技術を協力通信と組み合わせることによって、リレー端末のバッテリー切れを防ぎながら通信の信頼性を向上させる技術が提案されている。しかし従来のエネルギーハーベスティングにおいて回収できるエネルギー

は周辺環境に強く依存しており、長期間にわたって安定的にエネルギーを回収できるとは限らない。そこで、回収エネルギーが周辺環境に依存しない RF エナジーハーベスティングに着目し、初年度に無電源の協力通信を実現する RF エナジーハーベスティング協調通信を提案した。リレー端末が回収したエネルギーのみを用いて協力通信を行った場合、自身が本来持っていたバッテリーを一切消費しない、無電源の協力通信が実現可能となる。またさらなる高信頼化のために、平成 26 年度においてリレー端末のフィードバック情報によって、情報端末がエネルギー効率の良い動作を選択する、新たな無電源協力通信方式を提案した。提案方式では、情報端末がフィードバック情報を得る手法として、明示的 (Explicit) フィードバックと暗示的 (Implicit) フィードバックを考える。明示的フィードバックにおいてリレー端末は自身のバッテリーからエネルギーを消費して情報端末にフィードバック情報を伝える。一方で暗示的フィードバックでは、情報端末がリレー端末の信号を観測することによってリレー端末が通信しているかどうかを認識する。

図 5 に直接通信、フィードバックを用いない RF エナジーハーベスティング協調通信、本提案手法のアウトエージ確率を示す。なお、縦軸の Outage Probability は、宛先端末の瞬時受信電力と平均雑音電力の比から導出した相互情報量が、あるターゲットレート R を下回る確率として定義されるアウトエージ確率であり、以降では $R=1.0$ とした。横軸は宛先端末における平均受信電力と平均雑音電力の比である。リレー端末は AF 協調もしくは DF 協調方式での協力通信を仮定する。

図 5 から、提案手法において AF 協調及び DF 協調を用いた場合、直接通信の特性と比べて低いアウトエージ確率を達成しており、暗示的フィードバックを用いた DF 協調伝送は最も低いアウトエージ確率を示す。暗示的フィードバックを用いた DF 協調伝送のアウトエージ特性をフィードバック情報がない場合の特性と比べると、アウトエージ確率が 10^{-4} の領域において約 3.0dB の利得がある。これはフィードバック情報により、情報端末やリレー端末が利用可能な資源をより効率的に利用できているためである。また、直接通信と比べると暗示的フィードバックを用いた DF 協調伝送はアウトエージ確率が 10^{-4} の領域において約 7.0dB の利得がある。以上より、提案方式において、リレー端末が外部電源なしに協力通信を行う場合、暗示的なフィードバックを用いた DF 協調方式が最も信頼性の高い通信を達成することが示された。

本研究課題によって得られた結果を組み合わせることにより、半永久的に駆動するセンサネットワークの実現が可能であることが理論的に示された。しかし実用化に向けては、乗り越えるべき課題が未だ多数あり、今後さらなる検討が必要である。

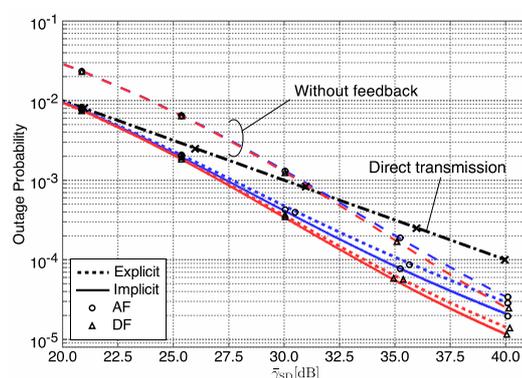


図 5：直接通信，フィードバックを用いない RF エナジーハーベスティング協調通信，提案手法のアウトエージ確率

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

K. Ishibashi and S. Sugiura, "Effects of Antenna Switching on Band-Limited Spatial Modulation," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, 査読有, vol. 3, no. 4, pp. 345-348, (2014.8)

K. Ishibashi, W.-Y. Shin, H. Ochiai, V. Tarokh, "A Peak Power Efficient Cooperative Diversity using Star-QAM with Coherent/Noncoherent Detection," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 査読有, vol.12, no.5, pp.2137-2147, (2013.5)

W.-Y. Shin and K. Ishibashi, "Hierarchical Cooperation in Ultra-Wide Band Ad Hoc Networks," *IEICE Trans. Commun.*, 査読有, vol.E96-B, no. 3, pp. 887-890, (2013.3)

W.-Y. Shin and K. Ishibashi, "Effect of Multiple Antennas on the Transport Capacity in Large-scale Ad Hoc Networks," *IEICE Trans. Commun.*, 査読有, vol.E95-B, no. 10, pp. 3113-3119 (2012.10)

〔学会発表〕(計 20 件)

N. Takeishi and K. Ishibashi, "Spatially Coupled Repeat-Accumulate Coded Cooperation," in *Proc. of IEEE WCNC2015*, 査読有, pp. 528-533, New Orleans, LA, USA (2015.3)

K. Ishibashi, "Relays without Batteries: A New Paradigm of Cooperative Diversity," in *Proc. of SmartCom2014*, 査読無, vol. 114, no. 284, SR2014-77, pp. 103-108, The Institute for Infocomm Research (I2R), Singapore (2014.10)

K. Ishibashi, "Dynamic Harvest-and-Forward: New Cooperative Diversity with RF Energy Harvesting," in *Proc. of WCSP '14*, 査読有, pp. 1-5, Hefei, China (2014.10)

H. Kawabata and K. Ishibashi, "RF

Energy Powered Feedback-Aided Cooperation,” in Proc. of IEEE PIMRC '14, 査読有, Washington D.C., USA, (2014.9)

武石直樹, 石橋功至, “Repeat-Accumulate 符号を用いた空間結合符号化協調に関する一検討,” 電子情報通信学会 2014 ソサイエティ大会, 査読無, B-5-81, 徳島大学 (徳島県徳島市), (2014.9)

武石直樹, 石橋功至, “重畳型適応ネットワーク符号化協調のための効率的繰り返し復調復号法,” 信学技報, 査読無, vol. 114, no. 164, RCS2014-102, pp. 75-80, 京都テルサ(京都府京都市), (2014.7)

川畑大樹, 石橋功至, “フィードバックを用いた RF エナジーハーベスティング協調伝送,” 信学技報, 査読無, vol. 114, no. 164, RCS2014-118, pp. 157-162, 京都テルサ(京都府京都市), (2014.7)

石橋功至, 杉浦慎哉, “帯域制限通信路における空間変調に関する一検討,” 信学信学技報, 査読無, vol. 114, no. 26, WBS2014-1, pp. 1-6, 名工大(愛知県名古屋市), (2014.5)

K. Ishibashi and G. Abreu, “Analysis of RF Energy Harvesting in Large-Scale Networks Using Absorption Function” in Proc. of ICASSP 2014, pp. 7004-7008, 査読有, Florence, Italy, (2014.5)

川畑大樹, 石橋功至, “RF エナジーハーベスティングを用いた Amplify-and-Forward 協調ダイバーシティの特性解析,” 信学技報, 査読無, vol. 113, no. 483, IT2013-82, pp. 175-180, 名古屋大学(愛知県名古屋市), (2014.3)

高井真人, 石橋功至, 和田忠浩, “セミブラインド干渉アラインメントにおける電力制約に関する一検討,” 電子情報通信学会 2014 総合大会 B-5-29, 査読無, 新潟大学(新潟県新潟市), (2014.3)

N. Takeishi, K. Ishibashi, and Y. Yamao, “Superimposed adaptive network coded cooperation for wireless sensor networks,” Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 査読有, 2013 IEEE 24th International Symposium on, pp.1180-1184, 8-11, London, UK (2013.9)

林 会発, 石橋功至, 藤井威生, “無線センサネットワークのための多層型適応ネットワーク符号化協調の設計,” 信学技報, 査読無, vol. 113, no. 130, RCS2013-120, pp. 229-234, 浜松アクトシティ(静岡県浜松市), (2013.7)

武石直樹, 石橋功至, 山尾 泰, “重畳型適応ネットワーク符号化協調に適した修正 LDGM 符号の提案,” 信学技報, 査読無, vol. 113, no. 93, RCS2013-40, pp. 19-24, 北海道大学(北海道札幌市), (2013.6)

M. Takai, K. Ishibashi, W.-Y. Shin, H.

S. Yi, and T. Wada, “Semi-Blind Interference Alignment Based on OFDM over Frequency Selective X Channels”, IEEE International Conference on Communications (ICC) 2013, 査読有, pp.5236-5241, Budapest, Hungary, (2013.6)

高井真人, 石橋功至, ウォンヨン シン, ヒョソク イ, 和田忠浩, “OFDM を利用したセミブラインド干渉アラインメントの実現性に関する一検討,” 信学技報, 査読無, Vol. 112, no. 264, pp.7-12, 京都大学(京都府京都市), (2012.10)

K. Ishibashi, H. Ochiai, V. Tarokh, “Energy Harvesting Cooperative Communications: Concept and Performance,” Proc. of TriSAI 2012, 査読有, pp. 1-5, Tokyo, Japan, (2012.9)

M. Takai, K. Ishibashi, W.-Y. Shin, H. S. Yi, and T. Wada, “Practical Semi-Blind Interference Alignment Exploiting Frequency Selectivity of Fading Channels,” Proc. of TriSAI 2012, 査読有, Tokyo, Japan, (2012.9)

K. Ishibashi, H. Ochiai, V. Tarokh, “Energy Harvesting Cooperative Communications,” IEEE PIMRC 2012, 査読有, pp. 1819-1823, Sydney, Australia, (2012.9)

石橋功至, ウォンヨン シン, 落合秀樹, バヒッド タローク, “Star-QAM を用いた省電力協調ダイバーシティ,” 信学技報, 査読無, vol. 112, no. 147, WBS2012-12, pp. 13-18, 名古屋大学(愛知県名古屋市), (2012.7)

〔その他〕

受賞

武石直樹, 石橋功至, “重畳型適応ネットワーク符号化協調のための効率的繰り返し復調復号法,” 2014 年度電子情報通信学会無線通信システム研究会活動奨励賞, 電子情報通信学会無線システム研究会, 2015年5月22日

高井真人, 石橋功至, ウォンヨンシン, ヒョソクイ, 和田忠浩, “Semi-Blind Interference Alignment based on OFDM over Frequency Selective X Channels,” 電気通信普及財団テレコムシステム技術学生賞, 電気通信普及財団, 2014年3月17日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石橋 功至 (ISHIBASHI, Koji)

電気通信大学・先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター・准教授

研究者番号: 80452176