

時空ブロック符号化を用いるマルチホップ協力通信のフィールド実験

Field Experiments of Multi-hop Cooperative Communications using Space-Time Block Code

大石 裕 司^{†*}, 正会員 村田 英 一[†]

Yuji Oishi^{†*} and Hidekazu Murata[†]

あらまし マルチホップ無線ネットワークにおいて、複数の無線局が中継することにより送信ダイバーシチ効果を得るマルチホップ協力通信が研究されている。これまでにマルチホップ協力通信の伝送特性に関する多くの研究があるがその多くは計算機シミュレーションや屋内での小規模な伝送実験に留まり、屋外実伝搬環境での伝送特性報告はほとんど見られない。本研究では時空ブロック符号化を用いる協力通信装置によって実際に電波を送信して実施したフィールド伝送実験結果について述べている。協力通信および一方の中継局のみを用いるマルチホップ通信の伝送特性をフィールドにおいてほぼ同時に測定し、宛先局におけるビット誤り率を指標として特性の比較を行っている。その結果、今回の条件では単一の中継局を用いる方式および定期的に良好な中継局に切り替える方式と比較して協力通信の特性が優れることが示されている。

キーワード：マルチホップ協力通信，時空符号，伝送実験，伝送特性

1. ま え が き

テレビ放送や放送素材伝送技術のデジタル化が進み、携帯電話や無線 LAN などに代表されるデジタル無線通信システムも広く普及した。これらにより、高精細な動画像が移動時にも視聴できるようになっている。このように高度なデジタル無線機器が遍在する社会となっているが、これらの無線機器は放送局からの電波の受信や、特定の基地局やアクセスポイント、宛先局と通信を行うのみである。近隣の他の無線機器と協調・協力して通信を行うことはほとんどない。

新たに期待される無線システムとして、遍在する無線局が近距離の中継を行い発呼局から宛先局までの通信を実現するマルチホップ伝送がある。この方式では電波到達距離を拡大する効果の他、発呼局-宛先局間がシャドウィングなどにより直接の通信が不可能な場合でも中継局を適切に選択することによりシャドウィングを回避し通信可能になる効果が得られる。しかし無線局間の伝搬路は市街地などにおいてはマルチパスフェージングにより変動しており、このような不安定な伝搬路を経由しての多段中継では発呼局-宛先局間の伝送特性確保が難しくなる。

伝送特性改善のため、各ホップにおいて複数の中継局が協力して伝送を行うマルチホップ協力通信方式がある¹⁾。一例として、同じ情報に異なる符号化を施し同時送信する時空符号化 (Space-Time Block Coding: STBC) により空間ダイバーシチ効果を得て誤りを低減する方式があり、計算機シミュレーションによりその効果が報告されている²⁾³⁾。

また、近年は協力通信を行う無線装置の実装やそれを用いた実験的研究も報告されている^{4)~15)}。これまでの協力通信に関する実験的研究としては、チャネル測定結果に基づき伝送特性計算を行った例⁵⁾や、1 台の中継局のみを用いて中継プロトコルに注目した実験例⁶⁾⁸⁾¹⁴⁾がある。また、STBC を利用する際の同期などについて実装を行った例¹³⁾がある。しかし、STBC などの信号処理レベルの協力通信技術を用いたマルチホップ協力通信の伝送特性を屋外伝送実験など現実に近い環境において示した例はほとんどない¹¹⁾¹²⁾。

分散配置した中継局を用いる協力通信では、放送分野における素材伝送¹⁶⁾などにおいても、シャドウィングを無線伝送技術で回避して広いエリアを確保できる。このため、例えば徒歩で移動する撮影者からの映像信号を専用設置された協力中継局によって中継するなどの利用方法が考えられる。また、今後の携帯電話では小型基地局間を高周波数帯で結ぶ無線フロントホールが検討されているが、これまでよりも低い位置に設置されるため樹木などのシャドウィングを受けることが懸念されている。このような場合でも、無線伝送技術で耐シャドウィング特性が得られる協力通信

2019 年 10 月 7 日受付, 2020 年 1 月 23 日再受付, 2020 年 2 月 7 日採録

[†] 京都大学大学院情報学研究科

(〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

* 現在, 日立製作所

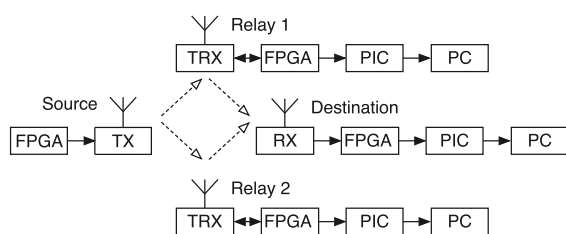


図 1 実験の構成

は有効であると考えられる。

本研究では、STBC を用いるマルチホップ協力通信について歩行者を想定した屋外リアルタイム伝送実験を行った¹¹⁾¹²⁾。実験には STBC による送信ダイバーシチを用いた 2 ホップ、2 中継局のマルチホップ協力通信を行う装置を用いた¹⁵⁾。比較対象として一方の中継局のみを用いるマルチホップ通信の特性も測定した。このとき伝送実験を複数回繰り返して各方式の特性を測定すると、実験の度に伝搬路が変化してしまうことが予想される。この伝搬路の違いによる特性の差を抑えるためには、各方式をできる限り同時に測定することが望ましい。しかし実際には各方式の伝送を同時に行うことは困難である。そこでパケット毎に中継方式を切り替えることにより、各方式の伝送特性をほぼ同時に測定した。これにより各中継方式の伝送特性の差異に対する伝搬路変動の影響を抑えることができると考えられる。

2. 実験装置

2.1 実験の構成

実験の構成を図 1 に示す。STBC を用いるマルチホップ協力通信としては最も簡単な 1 発呼局 (図中 Source)、2 中継局 (図中 Relay1,2)、1 宛先局 (図中 Destination) による 2 ホップ通信を行う。各無線局を空間的に離れた位置に配置して実験を行う。各中継局では発呼局の信号を受信し、受信系列に誤りがない場合のみ中継を行う。宛先局では復調したデータのビット誤り率 (Bit Error Ratio: BER) およびパケット誤り率 (Packet Error Ratio: PER) を測定し特性評価を行う。

2.2 装置の構成

文献⁴⁾⁹⁾¹⁵⁾の装置を用いる。装置はアンテナ、無線機、FPGA (Field Programmable Gate Array) ボード、PIC (Peripheral Interface Controller)、リアルタイムに全局のデータを集計し表示するための PC および電源からなる。これらを 1 セットとして台車に乗せ移動させる。実験装置の主要諸元を表 1 に示す。

各無線局は FPGA 上のデジタル回路にて信号処理をリアルタイムで行う。無線機では RF-IF 間の変換および増幅を行う。FPGA ボードでは A/D・D/A 変換、IF-ベースバンド間の変換およびベースバンドでの信号処理を行う。PIC では FPGA より出力されるビットおよびパケット誤

表 1 主要諸元

変調方式	$\pi/4$ shift QPSK
変調速度	21.1914 kHz
搬送波周波数	1.299 GHz
中間周波数	10.85 MHz
アンテナ	水平面内無指向性 (2.15 dBi)
最大送信電力	30 dBm
フィルタ	Root roll-off Nyquist ($\alpha = 0.7$)
FPGA	Stratix EP1S25F780C5
誤り検出	CRC-16
STBC	Alamouti scheme

りの情報から BER および PER を計算し、液晶パネルに表示する。また PIC は無線機より受信電力情報を取得し表示するとともに、FPGA より取得した誤り情報とともに PC へ出力する。PC はこのデータを集計し記録するのみであり、送受信の信号処理や装置の制御には関与していない。FPGA 内の回路は大きく送信部と受信部からなる。送信部ではまず 9 段 PN(Pseudo Noise) 系列発生器により送信データを生成する。トレーニング系列および誤り検出符号を付加した後に変調を行う。IF 周波数へのアップコンバートを行い D/A 変換を行う。この信号を無線機へ入力し電波を送信する。受信部では無線機からの IF 信号を入力し、A/D 変換およびダウンコンバートを行う。トレーニング系列との相関により自律的にシンボル同期を確立する。またこのときの相関値によりチャネル推定を行う。このチャネル推定値を用いて復調を行い、ビットおよびパケットの誤りを測定する。

2.3 送信信号の構成

システム全体で単一の周波数を用い、図 2(a) に示すように中継は時分割により行う。中継局は無線機の送受切り替えを行うが、今回用いた無線機の送受切り替え回路には機械式リレーを含んでいるため、切り替えが完了するまでには待ち時間が必要である。送受切り替え時における無線機の IF 入出力端子電圧が安定するまでの時間を測定したところ約 30 ms であった。そこで切り替え時間は約 50 ms と余裕を持って設定した。しかしこのような切り替え時間で 1 パケットごとに送受切り替えを行うと伝送効率が低下してしまう。そこで図 2(b) のように複数パケットを連続して送信する。これの連続したパケットをパケット群と呼ぶこととする。

このようなパケット群を時分割動作により伝送するため信号は間欠的に受信され、無信号区間において無線機の AGC(Automatic Gain Control) の利得が最大となってしまう。このため受信データの先頭数パケットでは利得が過大となって飽和し、受信信号が歪んでしまう。今回用いた無線機では AGC の時定数は約 20 ms と大きい。そこで図 2(b) のように送信信号の先頭 8 パケット (図中 Dummy) を特定パターンの AGC 安定用パケットとし、このパケットは BER および PER の計算の対象とはしない。続く 24 パケットを測定対象のデータパケットとする。AGC の時定数は 20 ms 程度でありパケット送信周期は 3.8 ms 程度で

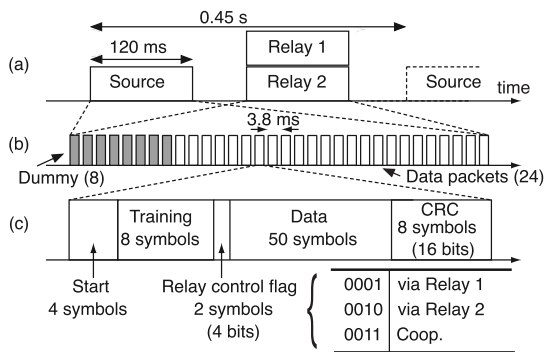


図 2 送信信号の構成

あるため、8つのAGC安定用パケットは受信信号を安定させるために十分な長さであると考えられる。

1つのパケットは図2(c)のようにスタート信号4シンボル、トレーニング系列8シンボル、中継制御フラグ4ビット、データ100ビット、誤り検出符号16ビットからなる。スタート信号はパケット間の短い無信号区間においてわずかに大きくなったAGC利得を調整し、後続のトレーニング系列の歪みを軽減する。トレーニング系列は各無線局に直交したものをあらかじめ割り当ててある。これにより受信信号がどの無線局から送信されたかを区別し、所望の送信信号を選択的に受信可能とした。

中継制御用フラグによりパケットごとに中継方式を切り替える。中継方式は中継局1のみを用いるマルチホップ通信、2のみを用いるマルチホップ通信、およびマルチホップ協力通信の3方式である。これらの3方式の測定結果より通常のマルチホップ通信とマルチホップ協力通信の特性の比較を行う。特性比較においては各方式の測定条件を可能な限り近くし、その特性差が方式の違いのみによって生じることが望ましい。しかし伝送実験を繰り返して各方式の特性を測定すると車や人などの移動により測定ごとに伝搬路が異なるため、伝搬路の差異による特性への影響があると考えられる。そこで連続する3パケットを1サイクルとしてサイクル内でパケット毎に3つの中継方式を切り替え、各方式の測定時における伝搬路の差異を抑える。これにより一度の測定でほぼ同時に各方式の伝送特性を測定し比較を行う。各無線局における送信パケットの様子を図3に示す。1回の送信24パケット内に3パケットのサイクルを設けサイクル内で協力通信、中継局2のみ、中継局1のみの中継方式をパケット毎に行い、このサイクルを8回繰り返す。

今回想定する徒歩程度の移動速度ではマルチパスフェージング(全周から一様な到来波を想定した場合)の空間相関係数は隣接パケット間でほぼ1である。仮に移動速度が10倍になると空間相関係数は0.9程度に低下する。

2.4 タイミング同期および周波数同期

STBCでは同一周波数を用いて同時送信を行うため、周波数同期およびタイミング同期が重要となる。しかし各無

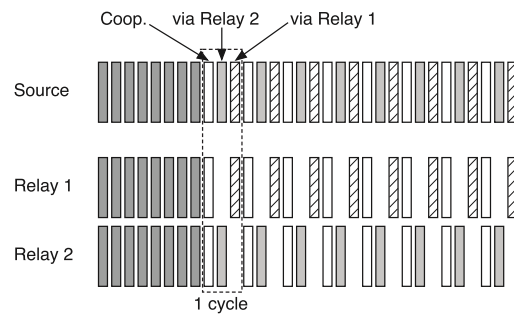


図 3 中継制御による3方式同時測定

線局は互いに離れた位置に配置されそれぞれ移動可能である。そのため各局を同期信号などの制御線で結ぶことは困難である。そこで各無線局は受信信号を参照して自律的にシンボル同期および周波数同期を確立する。シンボル同期回路がシンボル同期を確立し、自動周波数同期回路(Automatic Frequency Control: AFC)により周波数同期を確立する¹⁰⁾。

シンボル同期回路ではトレーニング系列と受信信号との相関により受信タイミングを自ら再生して時刻同期を確立し、再生したタイミングと相関のピークとのずれによりタイミングを修正し同期を保つ。これにより2台の中継局が発呼局の送信周期と同期して中継送信を行う。AFCでは連続するパケット間のチャネル推定値の回転をもとにキャリア周波数オフセットを推定する。周波数オフセットの有無に応じて無線機のRF周波数を1Hzステップで制御し周波数同期を確立する。

3. 伝送実験

3.1 実験方法

京都大学本部キャンパスに各局を配置し、実際に電波を送信して伝送実験を行った。無線局配置を図4に示す。発呼局を図4中Sの位置の4階渡り廊下に、中継局1を図4中R1の位置に、中継局2を図4中R2の位置に設置した。中継局の位置決定に際し事前測定を行い、誤り率がある程度小さくなる位置とした。アンテナ地上高は発呼局が14.2m、中継局および宛先局は1.5mとした。宛先局をほぼ一定の速度で移動させながら、中継局1のみまたは中継局2のみを用いた場合のマルチホップ通信および協力通信の場合について宛先局の誤り率を測定した。また、宛先局での受信信号電力も測定した。ただし受信信号電力は受信機のAGC電圧を基に換算しているため、どの局から送信された信号であるかを区別せず測定した値である。

測定は2回に分けて行い、1回目(図中Trial 1)の測定では約1260mを30分40秒で移動し、2回目(図中Trial 2)では約1170mを27分で移動した。平均速度はそれぞれ0.68m/sおよび0.72m/sであった。ただし中継局の送信電力は中継方式によらず一定であり、協力通信時は中継局の総送信電力はマルチホップ通信時に比べ3dB増加し

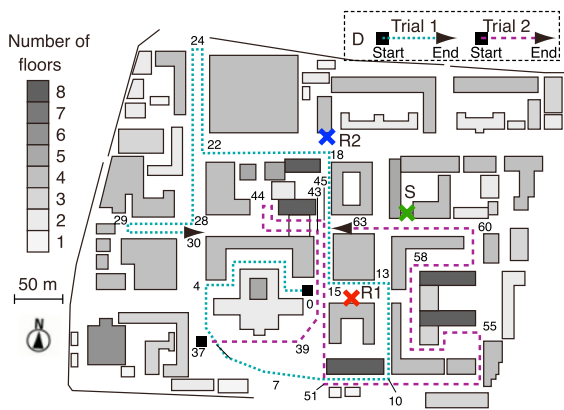


図 4 無線局配置と実験風景 (図中の数字は測定経過時間であり単位は分)

ている。

3.2 実験結果

図 5 に中継方式毎の宛先局における BER と受信電力 (図中 RSSI) の測定結果を示す。この図の BER はマルチパスフェージングを平均化するために約 60 波長に相当する 20 秒の区間で平均した BER である。なお全測定期間中の中継局 1 および 2 における平均 BER はそれぞれ 5.1×10^{-6} , 7.0×10^{-5} となった。図 5 より一方の中継局のみを用いた場合の誤り率 (図中 (i) via Relay 1 と (ii) via Relay2) よりも協力通信の誤り率 (図中 (iii) Coop.) はほぼ常に低く抑えられたことが分かる。

具体的には、17 分から 30 分の間は中継局 2 に最も接近した後遠ざかるため受信電力が概ね減少する区間であり、中継局 1 からの信号は建物によりシャドウイングを受けていると考えられる区間である。この区間では中継局 1 のみを用いた場合の BER は高いが、中継局 2 のみを用いた場合と協力通信の BER はほぼ一致した。

中継局 1 の横を通り過ぎた後両中継局の間に入っていく区間である 38 分から 42 分の間は受信電力が概ね増加している。この区間では一方の中継局のみを用いた場合の BER に比べ協力通信の BER は低くなった。このとき宛先局にはどちらの中継局からの信号も 1 信号のみでは誤りが発生したが、2 信号を合成して STBC による送信ダイバーシチ効果を得ることにより誤り率は低下したと考えられる。

建物によりシャドウイングを受けつつも中継局 1 の東側を北上する 55 分から 58 分の間では受信電力が一旦上昇し緩やかに減少している。この区間では中継局 2 のみを用いた場合の BER は高いが、中継局 1 のみを用いた場合と協力通信の BER は近くなった。このとき宛先局は一方の中継局からの信号のみ受信されており、送信ダイバーシチ効果を得られなかったものと考えられる。しかし協力通信の BER は、どちらか一方の中継局を用いた場合のうち誤り率の低い方の特性とほぼ一致した。これは中継局を分散配置したことによりシャドウイングを回避し、ネットワーク制

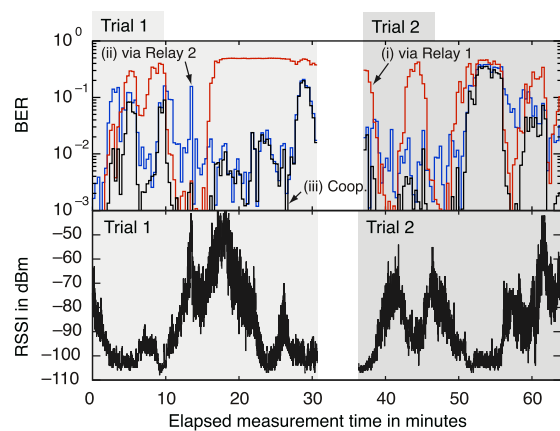


図 5 ビット誤り率と受信電力の測定結果

御なしにルートダイバーシチ効果を得られたためであると考えられる。

測定した (i)(ii)(iii) の 3 方式について宛先局における 1 秒間の区間平均 BER の累積分布関数 (Cumulative Distribution Function) を図 6 に実線で示す。この図には模擬的なルートダイバーシチの特性を (iv) Route diversity として実線で示している。このルートダイバーシチでは、中継局 1 のみの場合と中継局 2 のみの場合それぞれについて記録された 1 秒区間の平均 BER データを用い、誤り率が低い方の中継局を理想的に切り替えて利用したものとして計算した。なお、このようなルートダイバーシチを実装するには宛先局から中継局への通信回線の追加が必要となる。この図より、今回の条件では中継局 1 を経由した場合の特性が大きく劣ること、そしてルートダイバーシチでは中継局 1 と 2 を適切に利用することにより特性が改善されることが確認できる。協力通信ではさらに特性が改善されており、信号処理レベルでのダイバーシチ効果が得られていることがわかる。

今回の実験では他方式に比べて協力通信での中継局総送信電力が 2 倍に増加しているため、この影響を簡単に検討する。周波数フラットレイリーフェージング伝搬路では高 SNR (Signal-to-Noise power Ratio) 領域で受信電力が増加すると BER が半減することから、図 6 中の (i), (ii), (iv) の特性について BER を半減させたものを図中の破線で示した。図より、(iv) ルートダイバーシチの特性が協力通信の特性と近いものとなっている。このルートダイバーシチの特性は 1 秒毎に適切に中継局を選択し送信電力を集中させた場合の簡易な予想特性である。協力通信ではそのような制御なくほぼ同等の特性が得られている。

4. む す び

本研究では STBC を用いるマルチホップ協力通信のフィールドにおける伝送実験を行った。実験装置は離れた位置に配置した 4 台の無線局を用い、中継局では同一周波数

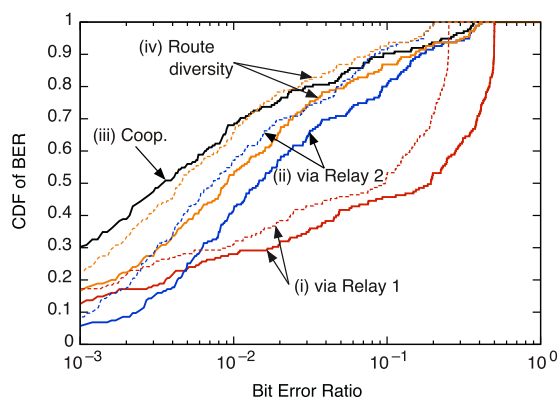


図 6 宛先局における BER の CDF 特性 (破線は簡易に送信電力差を補正した予想特性)

で同時送信する STBC を用いた。このために各無線局は、受信信号に対して自律的にタイミング同期および周波数同期を確立した。発呼局を 4 階に、中継局を発呼局の信号を直接受信可能な地上にそれぞれ固定設置し、宛先局を移動させ協力通信の伝送特性を測定した。パケットごとに中継方式を切り替えることにより、一方の中継局のみを用いるマルチホップ通信の特性もほぼ同時に測定した。これにより中継方式ごとの伝送特性の差に与える伝搬路変動の影響が小さくなるようにして特性を比較した。実験の結果、一方の中継局のみを用いる通常のマルチホップ通信や通信品質の良い中継局に 1 秒ごとに理想的に切り替えたルートダイバーシティと比較して、STBC による協力通信では BER が一定値以下となる時間割合が大きく増加した。

謝 辞

本研究は科研費 (20360170) の助成を受けたものである。

(文 献)

- 1) J.N. Laneman, D.N.C. Tse, and G. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, **50**, 12, pp.3062–3080, Dec. 2004.
- 2) 宮野剛, 村田英一, 荒木純道, "単一アンテナ端末間マルチホップ通信における STBC を利用した協力中継方式," *信学技報 MoMuC2003-143*, Mar. 2004.
- 3) T. Miyano, H. Murata, and K. Araki, "Cooperative relaying scheme with space time code for multihop communications among single antenna terminals," In *IEEE Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM '04*, **6**, pp.3763–3767, Nov. 2004.
- 4) B.T.N. Pham, T. Zakoji, H. Murata, and K. Araki, "Performance of digital transceiver for space-time coded cooperative multihop wireless communication systems," *Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics*, pp.1029–1032, Apr. 2005.
- 5) I. Hammerstroem, J. Zhao, S. Berger, and A. Wittneben, "Experimental performance evaluation of joint cooperative diversity and scheduling," In *IEEE 62nd Vehicular Technology Conference, 2005. VTC-2005-Fall*, **4**, pp.2428–2432, Sept. 2005.
- 6) S. Valentin, H. Lichte, D. Warneke, T. Biermann, R. Funke, and H. Karl, "Mobile cooperative WLANs - MAC and transceiver design, prototyping, and field measurements," In *IEEE 68th Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall*, pp.1–5, Sept. 2008.
- 7) T. Korakis, M. Know, E. Erkip, and S. Panwar, "Cooperative network implementation using open-source platforms," *IEEE Com-*

mun. Mag., **47**, 2, pp.134–141, Feb. 2009.

- 8) G. Bradford and J. Laneman, "An experimental framework for the evaluation of cooperative diversity," In *43rd Annual Conference on Information Sciences and Systems, 2009. CISS 2009*, pp.641–645, Mar. 2009.
- 9) 村田英一, 山本高至, 吉田進, "STBC を用いたマルチホップ協力通信装置の FPGA による試作," *信学技報*, **109**, 130, RCS2009-55, pp.13–17, July 2009.
- 10) 村田英一, 村田英一, 山本高至, 吉田進, "STBC を用いるマルチホップ協力通信装置の伝送特性," *信学技報*, **109**, 164, RCS2009-98, pp.121–125, Aug. 2009.
- 11) 大石 裕司, 村田 英一, 山本 高至, 吉田 進, "STBC を用いるマルチホップ協力通信のフィールド実験結果," *信学技報*, RCS2009-226, pp. 109–114, Jan. 2010.
- 12) Akihiro Kuwabara, Yuji Oishi, Hidekazu Murata, Koji Yamamoto, Susumu Yoshida, "Field experimental results of multi-hop cooperative communications using STBC technique," *Proc. the 74th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Fall)*, Ottawa, Sept. 2010.
- 13) P. Murphy and A. Sabharwal, "Design, implementation, and characterization of a cooperative communication system," *IEEE Trans. Inf. Theory*, **60**, 6, pp.2534–2544, July 2011.
- 14) N. Hussain, K. Ziri-Castro, D. Jayalath, M. Arafah, "Experimental evaluation of DCOOP protocol using USRP-RIO based testbed at 5.8GHz," *Proc. 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Sept. 2016.
- 15) H. Murata, M. Miyagoshi, and Y. Oishi, "Analytical end-to-end PER performance of multi-hop cooperative relaying and its experimental verification," *IEICE Trans. Commun.*, **E100-B**, 3, pp. 449–455, Mar. 2017.
- 16) 中川, 鶴澤, 光山, 池田: "2 × 2 STTC-MIMO-OFDM システムの野外実験 一びわ湖マラソンコースの高所受信における伝送特性一," *映像学技報*, **36**, 30, BCT2012-62, pp.9-12 (2012)



おおし ゆうじ
大石 裕司 平 20 京大・工・電気電子卒, 平 22 同
大大学院修士課程了。平 22 より日立製作所勤務。



むらた ひでかず
村田 英一 平 3 京大・工・電子卒, 平 5 同大大学
院修士課程了。平 5~14 同大助手。平 14 より東工大助
教授, 平 18 京大大学院情報学・助教授, 平 19 同准教
授, 現在に至る。工博, ワイヤレスネットワーク, 無線
伝送方式の研究に従事。平 9 信学会学術奨励賞, 平 12
エリクソンヤングサイエンティストアワード, 平 16 信
学会功労感謝状, 平 18 電気通信普及財団テレコムシ
ステム技術賞, 平 24 同奨励賞, 平 18 科学技術分野の文
部科学大臣表彰若手科学者賞, 平 20・22・28 信学会通
ソ活動功労賞, 平 23・25 信学会論文賞, 平 26 近畿情
報通信協議会会長表彰, IEEE ICC 2014 Best Paper
Award, 平 30 信学会通ソ功労顕彰状, 各受賞。正会員