



超高速移動通信の実現に向けた 10Gbps屋外無線伝送実験

移動通信における伝送速度のさらなる高速化のため、マイクロ波11GHz帯において8×16 MIMO-OFDM屋外伝送実験を実施し、世界で初めて10Gbpsを超える無線パケット伝送に移動通信環境で成功した。これによりIMT-Advanced以降の移動通信システムにおいて超高速移動通信の実現が期待できる。なお、本研究は総務省の委託研究「電波資源拡大のための研究開発」の一環として、東京工業大学大学院理工学研究科 鈴木・府川研究室（鈴木博教授、府川和彦准教授）との共同研究により実施した。

先進技術研究所
須山 聡 沈 紀暉
小田 やすひろ 恭弘

1. まえがき

近年、スマートフォンの登場により移動通信におけるトラフィックは急増しており、その膨大なトラフィックを処理するため、将来の移動通信システムでは、さらに高い伝送速度が要求されており、第4世代移動通信システムであるLTE-Advanced*1では最大1Gbpsを目標としている。さらに2012年6月に開催された3GPP (3rd Generation Partnership Project) のワークショップではポストLTE-Advancedに向けた議論が行われており、より高い周波数帯を利用した10Gbps伝送の検討が行われている[1]。

移動通信における無線伝送実験で

ドコモは、2006年12月に4GHz帯を用いて5Gbpsの無線パケット伝送に成功している[2]。今回はさらに高い周波数となる11GHz帯を用いて東京工業大学で開発した8×16 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)*2-OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)*3伝送装置[3][4]による屋外伝送実験を行い、世界で初めてとなる10Gbpsを超える伝送速度を移動通信環境で達成した。

これにより、将来の移動通信システムにおいて超高速無線伝送が実現し、大容量コンテンツを安価なサービス料金でユーザに提供可能になることが期待される。本稿では、この伝送装置および実験内容とその結果について解説する。

2. 8×16 MIMO-OFDM 伝送装置

2.1 装置諸元

8×16 MIMO-OFDM伝送装置の装置諸元を表1に示す。伝送方式はMIMO-OFDMであり、アンテナ当りの最大送信電力は25dBmである。搬送波周波数は11GHz、占有帯域幅は400MHzである。サンプリング周波数は800MHzで、FFT (Fast Fourier Transform)*4ポイント数は4,096であり、サブキャリア*5間隔は195kHzとした。1μsまでのマルチパス遅延*6に対応するため、ガード・インターバル (GI: Guard Interval)*7は1μsとし、このとき、OFDMシンボル*8長は6.1μsとなる。

©2014 NTT DOCOMO, INC.
本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

*1 LTE-Advanced: LTEの発展形無線インターフェースであり、3GPP Release 10として標準化された。

*2 MIMO: 複数のアンテナから、異なる信号を、同時に同周波数を用いて送信する技術。送信アンテナ数に合わせて空間多重数を増やすことで伝送速度を向上できるが、受信機において高度な信号検出技術が必要となる。

*3 OFDM: 狭帯域の直交サブキャリアを用い

て伝送を行う高性能なマルチキャリア伝送方式。マルチパスに対する耐性が高いため、LTEに採用されている。

*4 FFT: 高速フーリエ変換。時間領域の離散データを周波数領域の離散データに変換する高速アルゴリズム。一括で処理できる離散データ数をポイントと呼ぶ。

*5 サブキャリア: OFDMなどのマルチキャリア伝送において信号を伝送する個々の搬送波。

フレーム内のOFDMシンボル数はプリアンブル*⁹が3シンボル、データが9シンボルであり、装置を共用したMIMOチャネルサウンダ*¹⁰ [5]のフレーム構成に合わせた。パイロットサブキャリア数*¹¹は32で、データサブキャリア数*¹²は2,000である。DC (Direct Current)*¹³付近の2サブキャリアと帯域両端付近の14サブキャリアは使用していない。変調方式は64QAM (64 Quadrature Amplitude Modulation)*¹⁴とし、誤り訂正符号としてターボ符号*¹⁵を用いた。符号化率*¹⁶Rは3/4とし、このとき、最大伝送レートは11.8Gbpsとなる。ただし、フレーム長はMIMOチャネルサウンダとの装置共用化によりシンボル数に制約があり、その制約によりデータに対しプリアンブルの割合が当初のフレーム設計より高くなったため、最大伝送速度の導出ではプリアンブルの挿入損を無視した。

2.2 装置構成と信号処理

8×16 MIMO-OFDM伝送装置は、送信装置 (1筐体) と受信装置 (2筐体) より構成され、1筐体で8アンテナに対応した変調あるいは復調処理が可能である。

(1)送信装置

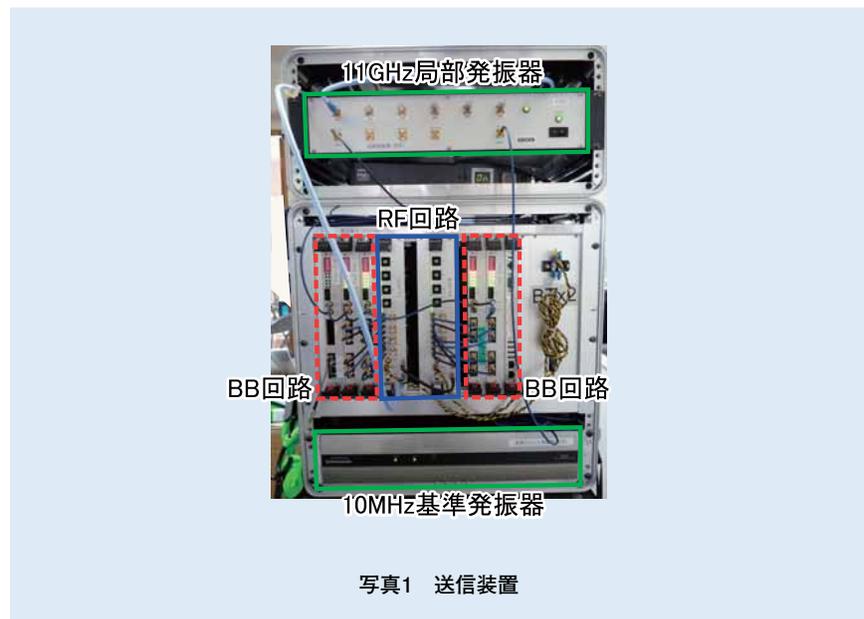
送信装置を写真1に示す。送信装置は、ベースバンド (BB : Base Band)*¹⁷回路、無線周波数 (RF : Radio Frequency)*¹⁸回路、11GHz帯局発振器*¹⁹、10MHz基準発振

器*²⁰から構成される。さらに、BB回路は、送信処理をオフライン (後処理) により実行するCPUボード、メモリを搭載したFPGA (Field

Programmable Gate Array)*²¹ボードと800MHzで動作するDAC (Digital to Analog Converter) から構成される。CPUボードで生成された、ス

表1 伝送装置諸元

伝送方式	MIMO-OFDM
送信電力	25dBm
搬送波周波数	11GHz
占有帯域幅	400MHz
サンプリング周波数	800MHz
FFTポイント数	4,096
サブキャリア間隔	195kHz
OFDMシンボル長	6.1 μs (GI : 1.0 μs)
フレーム内シンボル数	プリアンブル : 3, データ : 9
有効サブキャリア数	パイロット : 32, データ : 2,000
変調方式	64QAM
誤り訂正符号	ターボ符号 (符号化率 R = 3/4)
最大伝送レート	11.8Gbps



*6 マルチパス遅延：送信された電波が建物や地形などによって反射・散乱・回折し、複数の経路を経ることで複数の遅延波として受信すること。
 *7 GI：マルチパス遅延によって引き起こされるシンボル間干渉を抑えるため、各OFDMシンボルの後半の一部をシンボルの先頭に挿入した信号区間。CP (Cyclic Prefix) とも呼ばれる。
 *8 OFDMシンボル：伝送するデータの単位で

あり、OFDMの場合は複数のサブキャリアから構成される。各シンボルの先頭にはGIが挿入される。
 *9 プリアンブル：パケットの先頭に配置された固定パターン信号。受信側では、これを用いてパケットの検出、ゲイン制御、フレームの同期、周波数同期などを行い、データ部の受信に備える。
 *10 MIMOチャネルサウンダ：MIMOにおける伝搬チャネルを測定するための装置。

*11 パイロットサブキャリア数：パイロット信号の伝送に用いるサブキャリアの数。
 *12 データサブキャリア数：データ信号の伝送に用いるサブキャリアの数。
 *13 DC：直流 (周波数0 Hz) の成分。
 *14 64QAM：変調方式の種類。64QAMは振幅と位相が異なる64通りの信号点に情報ビットを変調する。1回の変調で6ビットの情報を送ることができる。

トリームごとにターボ符号化されたMIMO-OFDM信号は、FPGAボード上のメモリに書き込まれ、DACからBB信号として繰返し出力される。RF回路は、出力されたBB信号を低域通過フィルタ（LPF：LowPass Filter）^{*22}により帯域制限した後、11GHz帯に直交変調^{*23}する。本伝送装置では11GHz帯局部発振器として高精度なものをを用いたため、位相雑音^{*24}の影響は無視できるレベルであった。また、10MHz基準発振器にはセシウム発振器^{*25}を用いた。

(2)受信装置

写真2のように、受信装置は送信装置と同様な構成となっているが、BB回路には800MHzで動作するADC（Analog to Digital Converter）が構成されている。実験では受信装置として2筐体用いることで16

アンテナに対応した復調処理を実現する。なお、同一の局部発振信号と基準発振信号を分配して2筐体で用いた。また、送信筐体と受信筐体の時間同期は、両筐体を同軸ケーブルで接続し、クロック信号に基づいて同一のタイミングになるように調整した。調整後、同軸ケーブルを外して伝送実験を行った。したがって、同期精度は個別のセシウム発振器の安定度に依存するが、その影響は全くなかった。

受信アンテナからRF回路に入力されたRF信号は、BB信号に変換され、LPFにより帯域制限された後、ADCに入力される。ADCにより800MHzでサンプリングされた受信信号は、FPGAボード上のメモリに保存される。測定が終了すると、CPUボードはFPGAボードから受信信号を取得し、外部HDDに保存

する。

(3)ターボ検出

受信信号はFFTにより周波数領域に変換された後、ターボ検出により信号検出が行われる。ターボ検出は、誤り訂正符号化されたMIMO伝送の信号検出方法の1つであり、本伝送装置では、誤り訂正符号としてターボ符号を用いている。ターボ復号器の出力を信号検出に利用する繰返し処理を行うことで受信性能を向上する[6]。ターボ検出の初回処理では従来の線形検出^{*26}として動作する。一方、繰返し処理ではターボ復号器から得られたビットの信頼度情報から全ストリームの受信信号レプリカ^{*27}を生成する。次に、所望ストリームに対して干渉となる他ストリームの受信信号レプリカを受信信号から減算する。さらに、その出力を線形フィルタにより合成し、ビットの信頼度情報を算出する。最後にその信頼度情報をターボ復号器に再度入力する。ターボ検出では干渉成分を除去することで信頼度が向上し、さらに、この一連の処理を繰り返すことで受信性能を向上する。

(4)高精度キャリブレーション

本伝送装置におけるIQインバランス^{*28}、チャンネル偏差^{*29}、クロック位相差^{*30}などのRFおよびBB回路の不完全性を補償するため、送受信信号処理においてRFおよびBBキャリブレーションを行い、装置の高精度化を図った[3] [4]。RFキャリブレーションにより、直交変復調器の



写真2 受信装置（一部）

*15 ターボ符号：誤り訂正符号の1つであり、2つの符号器を連結して符号化を行う。復号には符号器に対応した2つの復号器が用いられ、それぞれの復号器から得られた信頼度情報をやり取りしながら、繰返し復号を行う。これはターボ復号と呼ばれ、強力な誤り訂正能力が得られる。
*16 符号化率：情報ビット数と、その情報ビットを誤り訂正符号化した後のビット数との比。例として、符号化率が3/4の場合は、

情報ビット数3に対し、誤り訂正符号化により4ビットを生成する。

*17 BB：変調前および復調後の信号帯域。
*18 無線周波数（RF）：無線信号の搬送波に使用される周波数。
*19 局部発振器：BB信号をRF信号に変調する、あるいはRF信号をBB信号に復調するための、搬送波信号を生成する発振器。
*20 基準発振器：サンプリング周波数や搬送波周波数などを高精度で生成するための基準

周波数を生成する発振器。

*21 FPGA：アレー状に並んだセルと配線用素子で構成されている書換え可能で、論理回路を自由に設計することができる大規模集積回路。
*22 低域通過フィルタ（LPF）：低い周波数帯域のみを通過させるフィルタ。

IQインバランスをその逆特性を送受信信号に与えることで補償した。また、BBキャリブレーションでは、ADC/DACのチャンネル偏差やクロック位相差を、所望の信号品質を達成するように調整した。

3. 10Gbps屋外無線伝送実験

3.1 実験諸元

10Gbpsを超える超高速伝送移動通信の実証のため、屋外伝送実験を沖縄県石垣市浜崎町地区において実施した。上り回線における10Gbps伝送とし、写真3に示す移動局(MS: Mobile Station)に送信筐体を搭載し、8ストリームのMIMO-OFDM信号を送信した。MSアンテナは水平面内が無指向性^{*31}で、アンテナ利得^{*32}は4dBi (decibel isotropic)^{*33}、アンテナ設置場所の高さ(アンテナ高)は2.5mである。また、基地局(BS: Base Station)としてマンション3階の部屋に受信筐体を置き、写真4に示す16素子指向性アンテナをベランダに設置した。12素子に加えて、長方形のレドーム^{*34}内に4素子が存在する。また、BSアンテナは、半値ビーム幅^{*35}が水平面内65度(垂直面内8度)の指向性アンテナで、アンテナ利得が15dBi、アンテナ高を8mとした。MSおよびBSアンテナ共にアンテナ間隔は約3波長とし、垂直偏波を用いた。

図1に示す測定コースをMSは平

均時速9kmで走行した。測定コースの走行距離は160mである。BSの指

向性アンテナは走行距離が測定開始地点から30mのA地点に向けた。



写真3 8素子オムニアンテナを用いるMS

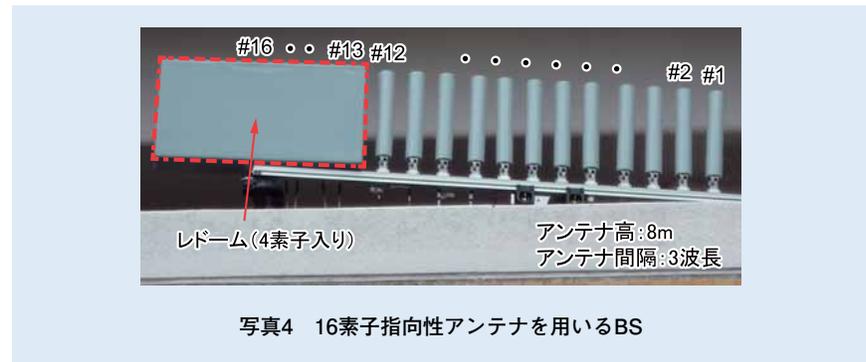


写真4 16素子指向性アンテナを用いるBS

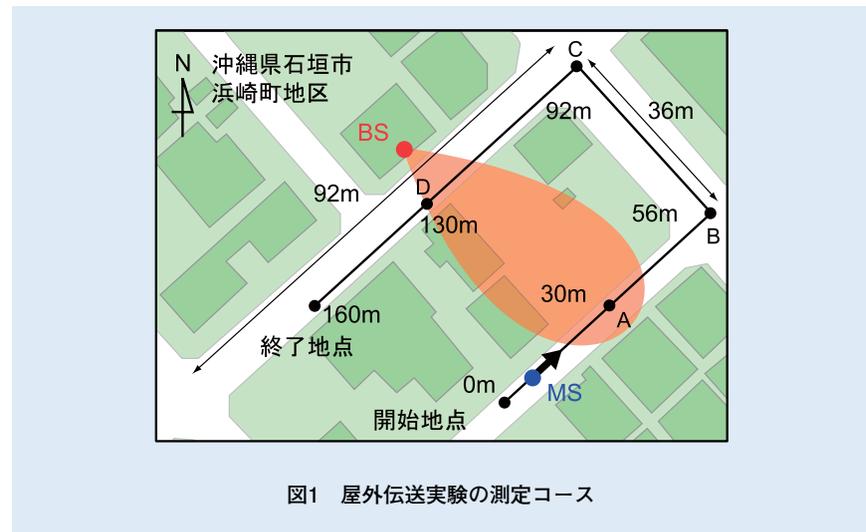


図1 屋外伝送実験の測定コース

*23 直交変調: BB信号の同相成分と直交成分に対して、90°位相差をもつ2つの正弦波信号を乗算し、それらを加算することでRF信号に変換する方式。
 *24 位相雑音: 局部発振信号における搬送波周波数以外の周波数成分によって発生する位相変動。
 *25 セシウム発振器: 基準信号としてセシウムを用いて、非常に高精度な基準周波数を作り出す原子時計。

*26 線形検出: MIMO伝送の場合では、各受信アンテナにおける受信信号に対して重み係数を乗算し、全アンテナにおける乗算結果を足し合わせることで信号を検出する方法。その重み係数の算出方法によって分類されている。
 *27 受信信号レプリカ: 受信機で生成された受信信号の推定値。
 *28 IQインバランス: 直交変復調器における同相成分と直交成分の振幅偏差と、90°移相

器の位相誤差。
 *29 チャンネル偏差: 信号間の振幅および位相の偏差。
 *30 クロック位相差: 発振器のジッタなどにより発生するクロック信号の位相差。
 *31 指向性: アンテナの放射特性の1つで、アンテナの電波放射方向とその方向における放射強度との関係を示す指標。

3.2 実験結果

MSが測定コースを走行した際にBSで測定された平均SNR (Signal to Noise Ratio)^{*36}分布を図2に示す。平均SNRはBSにおいて16素子受信アンテナで測定されたSNRを平均して求めた1受信アンテナ当りのSNRである。横軸は測定開始地点からの走行距離で、MSに設置したGPSにより位置情報を取得し、走行距離に換算した。図1のA, B, C, D地点までの走行距離はそれぞれ30m, 56m, 92m, 130mである。測定開始地点から15m程度は建物の影響により見通し外であるが、A地点付近では指向性アンテナの効果により高いSNRが観測された。最大SNRは16.0dBであった。B地点からC地点においては、建物の影響によりSNRが低下するが、C地点からD地点においては見通し内となるため、8dB以上の比較的高いSNRが観測さ

れた。このエリアは、BSからは離れていないが、指向性アンテナの垂直面内の利得が低下するため、A地点付近ほどSNRは高くない。

屋外伝送実験で測定された受信信号をオフライン処理して算出した64QAM, $R=3/4$ におけるスループット^{*37}特性を図3に示す。スループットは、 $(1 - \text{ブロック誤り率}) \times 11.8\text{Gbps}$ により算出した。なお、ブロックは1 OFDMシンボルで構成され、その単位で符号化される。また、ターボ検出の最大繰返し回数は2とし、各繰返し処理においてターボ復号を6回繰返しした。比較のため、ターボ検出の初回処理と2回の繰返しの結果を示す。図3より2回繰返しのターボ検出により全区間においてスループットが改善できることがわかる。特に、走行距離が100mから120mの区間では、初回処理では10Gbpsを下回ることがある

が、2回の繰返しにより常に10Gbpsを超えるスループットを実現できることが分かった。

なお、図2のA地点付近では高いSNRにもかかわらず、図3の同地点では10Gbpsを達成できていない。A地点付近では直接波が支配的となるため、空間相関^{*38}が高くなり、ストリーム検出が難しくなるためである。また、本伝送実験は10Gbps以上のスループットを目指し、符号化変調方式として64QAM, $R=3/4$ のみを用いたため、B地点からC地点までおよびD地点以降の区間では、伝送品質が悪く、スループットが0Gbpsになっている。一方、10mから20mまで、C地点からD地点までは見通し波の影響が小さくなることでSNRは低下するものの、マルチパス波が増えることでストリーム検出が可能となり、10Gbpsを超えるスループットを達成できることが分かった。

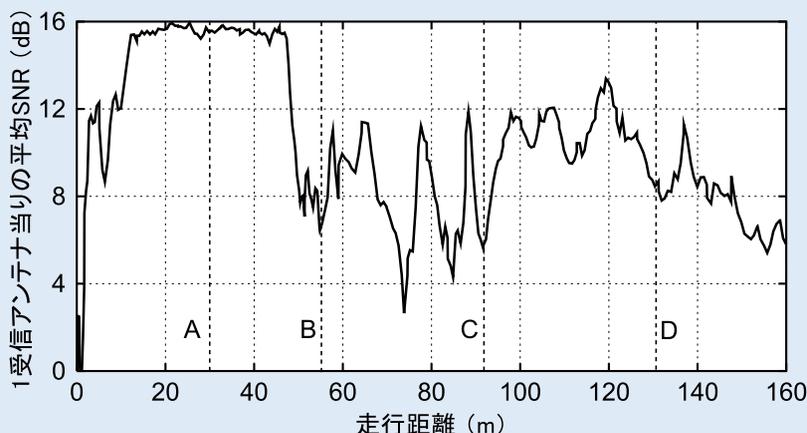


図2 測定されたSNR分布

*32 アンテナ利得：アンテナの放射特性の1つで、アンテナの最大放射方向の放射強度が基準アンテナの何倍あるかを示す指標。
 *33 dBi：仮想的な等方向性（アイソトロピック）アンテナを基準とした際のアンテナ利得を表す単位。
 *34 レドーム：アンテナを保護する囲い。電波を透過しやすい材料で作られている。
 *35 半値ビーム幅：アンテナの最大利得から-3dB以内の利得をもつアンテナの放射角

度。単にビーム幅とも呼ばれる。
 *36 SNR：雑音の電力に対する所望信号の電力の比。
 *37 スループット：単位時間当りに、誤りなく伝送される実効的なデータ量。

*38 空間相関：空間的に離れた2点のチャンネル間のフェージングの相関。電波の到来状況および2点間の位置関係に依存する。空間相関が高いと信号の分離が難しくなりMIMOのチャンネル容量が低下する。

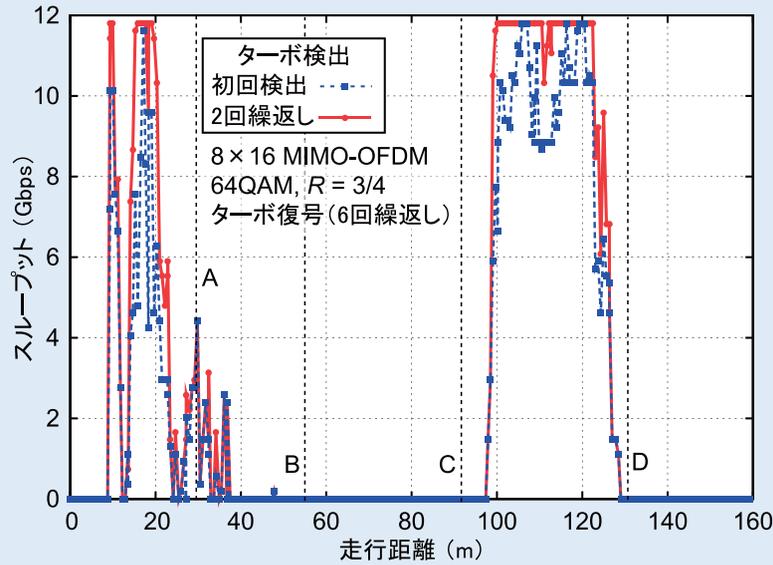


図3 スループット特性

4. あとがき

本稿では、移動通信における超高速伝送を実証するために開発されたマイクロ波11GHz帯8×16 MIMO-OFDM伝送装置について紹介した。さらに、10Gbps屋外伝送実験の内容とその結果について示し、世界で初めて10Gbpsを超えるスループットを移動通信環境において達成できることを実証した。これにより将来の移動通信システムにおいて超高速移動通信の実現が期待できる。

文献

[1] NTT DOCOMO: "Requirements, Candi-

date Solutions & Technology Roadmap for LTE Rel-12 Onward," 3GPP RWS-120010, Jun. 2012.

[2] H. Taoka, K. Dai, K. Higuchi and M. Sawahashi: "Field Experiments on MIMO Multiplexing with Peak Frequency Efficiency of 50 Bit/Second/Hz Using MLD Based Signal Detection for OFDM High-Speed Packet Access," IEEE J. Sel. Areas Commun., Vol. 26, No. 6, pp. 845-856, Aug. 2008.

[3] S. Suyama, H. Fukuda, H. Suzuki and K. Fukawa: "10 Gbps 8×8 MIMO-OFDM Broadband Experimental System for 11 GHz Band Super High Bit-Rate Mobile Communications," Proc. of Inter. OFDM-Workshop 2012, pp. 115-120, Aug. 2012.

[4] 須山 聡, シン キュン, 小田 恭弘,

鈴木 博, 府川 和彦: "超高速ビットレート移動通信を実現するための10 Gbps MIMO-OFDM屋外伝送実験," 信学技報, Vol.112, No. 443, RCS 2012-327, Feb. 2013.

[5] Y. Konishi, Y. Chang, M. Kim, Y. Maruichi, P. H. Van and J. Takada: "Multi-link indoor MIMO measurements at 11 GHz using scalable wide-band channel sounder," 2012 Inter. Sympo. on Antennas and Propagation, pp. 335-338, Nov. 2012.

[6] T. Abe and T. Matsumoto: "Space-time turbo equalization in frequency selective MIMO channels," IEEE Trans. Vehic. Tech., Vol. 52, Issue 3, pp.469-475, May 2003.