

# 端末連携システムの実験に向けた 427MHz 市街地受信強度測定

千葉 竜樹<sup>†</sup> 村田 英一<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 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

E-mail: †contact-h28j@hanase.kuee.kyoto-u.ac.jp

あらまし 携帯端末間で受信信号を共有することにより等価的にアンテナ数を増大させ基地局におけるプリコーディングを不要とする MIMO 通信システムが研究されている。このシステムでは伝搬路情報のフェードバックが不要であり、移動に伴う伝搬路の変化に強くなる。本稿では、受信信号共有に高周波数帯を用いるシステムの屋外伝送実験に向けて京都市街地にて実施した受信強度測定結果を報告する。

キーワード マルチユーザ MIMO, プリコーディング, 高周波数帯, 屋外伝送実験, 伝搬測定

## Measurement Campaign at 427MHz in Residential Area for User Collaborated Reception

Tatsuki CHIBA<sup>†</sup> and Hidekazu MURATA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Informatics, Kyoto University, Yoshida-hommachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-6501, Japan

E-mail: †contact-h28j@hanase.kuee.kyoto-u.ac.jp

**Abstract** Terminal collaborated multi-user multiple-input multiple-output transmission systems have been studied recently. In this system, received signals are shared among mobile terminals. This system does not require channel state information (CSI) feedback and is robust to channel variations. In this paper, a measurement campaign in a residential area for user collaborated reception using higher-frequency bands is reported.

**Key words** MU-MIMO, Channel state information, Measurement campaign, User collaborated reception

### 1. はじめに

近年スマートフォン等の普及により年々通信トラフィックは急増し、セルラーシステムの容量を圧迫している。今後も増大し続けるであろう通信トラフィックを収容するためには、周波数資源をより有効に利用する必要がある。周波数利用効率の向上を支える基盤技術の一つとして MIMO (Multiple Input Multiple Output) 伝送がある。

MIMO 伝送は送信側で複数のアンテナから同一周波数帯にて異なる信号 (ストリーム) を同時に送信し、受信側でも複数のアンテナで同時に受信することにより周波数利用効率を向上させることが可能である。また、MIMO 伝送における通信路容量は、送受信機のアンテナ数の小さい方に依存する。しかしスマートフォンのような移動端末は、物理的制約から搭載できるアンテナ数に制限がある。

そこでマルチユーザ MIMO (MU-MIMO) 伝送の研究がされてきた。複数の端末を受信に用いることでアンテナ数を増加させることが可能となる。代表的な MU-MIMO 伝送では、同周波数で同時に送信された複数の信号から所望の信号のみを端末側で受信するため、基地局にてプリコーディングを施す。しかし移動端末における伝送では、プリコーディングに用いた伝

搬路情報と実際の伝搬路の間に差異が生じ、ストリーム間干渉を起し伝送特性が劣化する [2]。

これに対し、基地局から受信した信号を携帯端末間で共有して等価的にアンテナ数を増大させ [6]、干渉を抑圧することによりプリコーディングを不要とする MU-MIMO 伝送の受信システムが研究されている [1], [3]~[5], [7]。この端末連携システムでは、伝搬路情報のフェードバックが不要となり移動に伴う伝搬路の変化に強くなる [12]。

次世代の移動通信システムでは大容量化や高速化に伴い、高周波数帯を使用することが可能な端末の普及が見込まれる。その際は、伝搬特性から高周波数帯はスモールセル内で用いられると考えられる。端末連携システムにおける信号共有を高周波数帯で行うことで、スモールセル外においても高周波数帯を有効活用でき、周波数利用効率の向上を図ることが可能となる。

これまで、端末間の信号共有に無線 LAN を使用して端末連携システムが実現されてきた [13]。これに対し、今後は 12.8 GHz 帯での連携へ拡張を図り、屋外伝送実験を行う。その際、基地局から端末への伝送は 427 MHz 帯の周波数を用いる。

屋外伝送実験の実施に向けて、伝送実験コースの選定が求められる。今回の周波数帯と伝送距離では受信電力は秦式を用いることで概ね把握可能であるが、特定のコースにおける受信電

力を知るためには実際の測定が必要である。そのため本稿では、基地局から 427 MHz 帯の周波数で電波を送信し、京都市街地における受信強度測定を実施した。測定結果の報告および秦式との比較を行う。

## 2. 検討するシステムモデル

本稿における、端末共同受信を用いたシステムモデルを図 1 に示す。基地局アンテナ数  $N$  本、遅延波が  $L$  本、単一のアンテナを備えた移動端末数  $M$  台の MU-MIMO 伝送において、移動端末で時刻  $k$  に受信される信号  $\mathbf{y}(k) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  は以下の式で表される。

$$\mathbf{y}(k) = \sum_{l=0}^L \mathbf{H}(l)\mathbf{x}(k-l) + \mathbf{n}(k) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{H}(l) \in \mathbb{C}^{M \times N}$  は第  $l$  パスの伝搬路行列である。 $\mathbf{x}(k) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  及び  $\mathbf{n}(k) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  はそれぞれ時刻  $k$  に基地局から送信される信号と雑音信号である。MIMO 伝送では、ストリーム間干渉と、遅延波によるシンボル間干渉が同時に生じるため、これらの干渉を抑圧して所望信号を得る技術が必要となる。

本稿のシステムでは、連携端末間で受信信号を共有することにより端末側でのストリーム間干渉の抑圧を行い、周波数領域での等化処理を繰り返し行うことでストリーム間干渉及びシンボル間干渉を抑える。さらに、LDPC 符号 [8], [9] による符号化を施し、干渉となるレプリカを生成して受信信号に減算させる処理を繰り返す [10] ことにより干渉信号の抑圧 [11] を行い、良好な受信特性での伝送を可能とする。LDPC の復号法としては、繰り返し復号法である Belief Propagation (BP) 法を用いる。図 2 に周波数領域繰り返し等化のブロック構成を示す。

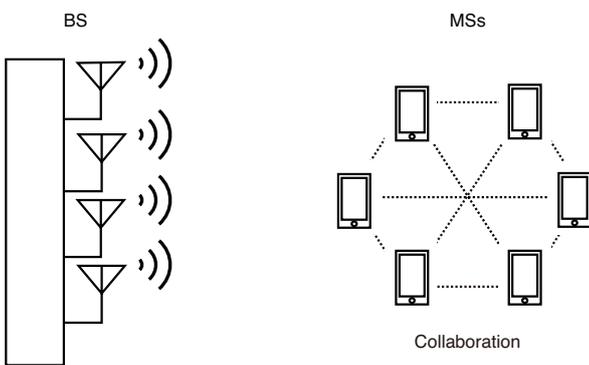


図 1 システムモデル

## 3. 受信強度測定

### 3.1 装置構成

受信強度測定に用いた基地局装置はシグナルジェネレータ (SG) とパワーアンプである。また、基地局用の水平面内無指向性グラウンドプレーンアンテナ (ノンラジアル) を 4 本用意し、京都大学本部総合研究 9 号館南棟屋上に設置した。配置は図 3 のような長方形である。東西方向で隣接するアンテナ間

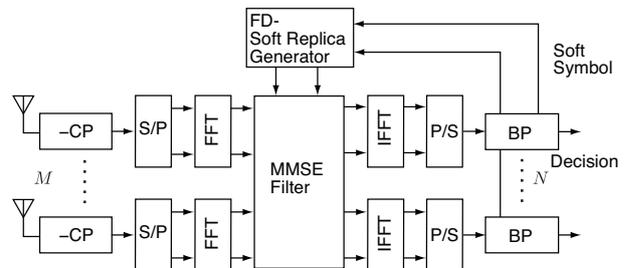


図 2 周波数領域繰り返し等化の構成

の距離は 3.8 m で約 5.4 波長、南北方向で隣接するアンテナ間の距離は 2.5 m で約 3.6 波長である。基地局アンテナの地上高は 25.5 m である。

受信アンテナも水平面内無指向性であり、車両のルーフに設置した。ただし車両の都合により、受信アンテナの地上高は 1.4 m もしくは 2.1 m である。この相違については後に検討する。

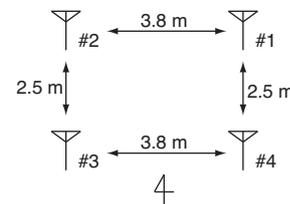


図 3 アンテナ配置図

### 3.2 実験諸元

本稿の測定諸元を表 1 に示す。測定の際は、基地局に設置された 4 本のアンテナから同時に無変調連続波 (continuous wave) を 427 MHz 帯で送信した。今回の測定では平均値を素早く算出できるように 10 kHz ずつ送信周波数が異なる 4 つのアンテナを用いてデータ取得数の増大を図った。また、受信アンテナの形式は  $1/4 \lambda$  モノポールである。

表 1 測定, 基地局, 測定器諸元

System Parameters	Values
Number of antennas of BS	4
Number of antennas of MS	1
BS Parameters	Values
Transmit power	35 dBm
Antenna gain	5.8 dBi
Height of BS antenna	25.5 m
Cable loss	1.4 dB
Frequency of antenna 1	427.190 MHz
Frequency of antenna 2	427.200 MHz
Frequency of antenna 3	427.210 MHz
Frequency of antenna 4	427.220 MHz
MS Parameters	Values
Height of MS antenna (Car 1)	1.4 m
Height of MS antenna (Car 2)	2.1 m
Interval of Measurement	1 s

### 3.3 測定方法

基地局を中心として半径約 5 km 圏内の京都市街地を走行した。位置情報は車両に搭載した GPS ロガーによって取得した。ポータブルスペクトラムアナライザによって、1 秒毎に受信電力を測定した。走行は交通の流れを乱さない程度とした。また、信号待ち等により停車することもあったため、走行速度は一定ではない。

### 4. 実験結果

京都市街地で走行し、1 秒毎に受信した 4 つの周波数における電力の平均値を算出した。算出された電力の平均値を地図上にプロットしたものを図 4 に示す。この図より、特定の地点における基地局からの受信電力を知ることができる。ただし、測定に使用した車両によって受信アンテナの地上高は異なるが、図 4 では両者の受信電力の平均値を一つの地図上にプロットしている。

受信アンテナの地上高が異なることによって、測定された受信強度が変化した可能性が考えられる。ゆえに、受信アンテナの地上高の違いによる平均受信強度の相違を検討する必要がある。そのため、異なる受信アンテナの地上高で測定された同区間における受信強度を比較したものを図 5 に示す。なお、比較区間には京都市左京区堀川通の南北約 2 km を使用した。区間内における平均受信強度は、受信アンテナの地上高 1.4 m、2.1 m に対してそれぞれ  $-92.9$  dBm、 $-91.6$  dBm であった。1.3 dB の違いが見られたが、小さな差異と考えられるため、それぞれの受信アンテナの地上高に対応する受信強度を図 4 のように一つの地図上にプロットしても問題ないと判断することができる。

また、測定地点別に受信電力の平均値を表したものを図 6 に示す。図から分かる通り、測定範囲の最南端である京都駅付近では、多少の前後はあるがおおよそ  $-100$  dBm の受信強度を示している。同様に、最北端である岩倉においても、受信強度はおおよそ  $-100$  dBm である。最も受信電力が低かった地点は清水寺の裏山付近であり、測定された値は  $-120$  dBm を下回った。

続いて、測定結果と秦式を比較する。測定結果から簡易的に 50 サンプル点毎、すなわち 50 秒毎における受信電力の平均値を算出した。次にこれを用いて、基地局からの距離と平均受信電力の関係性を取得し、秦式と比較したものを図 7 に示す。この図から、おおよそ距離 2 km 地点まで、測定された受信電力強度の方が秦式と比べて低いことがわかる。2 km 地点内での違いを除けば、測定された受信強度は秦式の受信強度と概ね一致していることが分かる。

伝搬損失の比較に用いた秦式を以下に示す。 $L_p$  は伝搬損失 (dB)、 $f$  は周波数 (150 ~ 2000 MHz)、 $h_b$  は基地局アンテナ高 (30 ~ 200 m)、 $h_m$  は受信アンテナ高 (1 ~ 10 m)、 $d$  は基地局と端末間の距離 (1 ~ 20 km) である。ただし、基地局アンテナの地上高は 30 m 以上でなければならない制限が秦式には設けられているが、本稿では基地局アンテナの地上高を 25.5 m とし秦式を適用した。

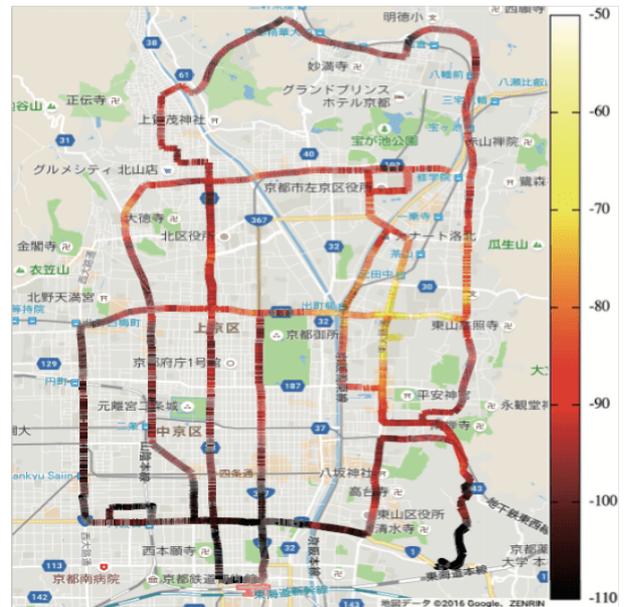


図 4 京都市街地における受信強度

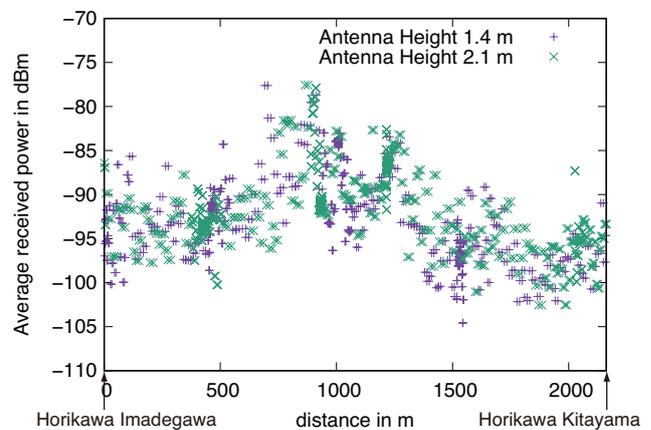


図 5 同区間における各受信アンテナの受信強度

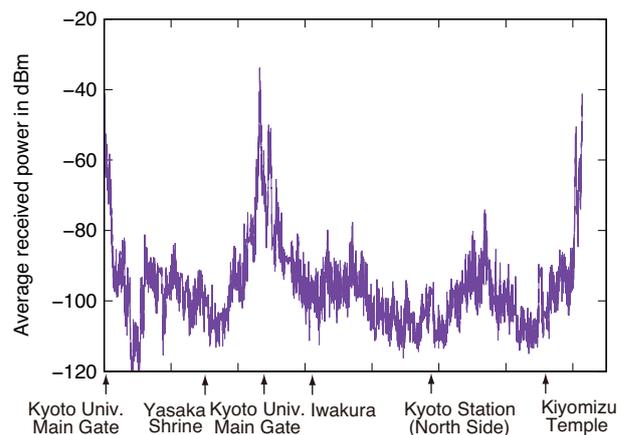


図 6 地点別における受信強度

$$L_p = 69.55 + 26.16 \log f - 13.82 \log h_b - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log h_b) \log d + C \quad (2)$$

大都市

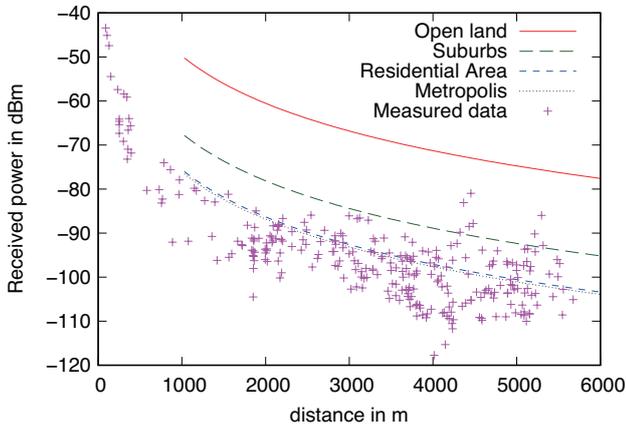


図7 測定値および秦式の比較図

$$a(h_m) = 8.29\{\log(1.54h_m)\}^2 - 1.1 \quad (f \leq 400 \text{ MHz}) \quad (3)$$

$$a(h_m) = 3.2\{\log(11.75h_m)\}^2 - 4.97 \quad (f \geq 400 \text{ MHz}) \quad (4)$$

$$C = 0 \quad (5)$$

中小都市

$$a(h_m) = (1.1 \log f - 0.7)h_m - (1.56 \log f - 0.8) \quad (6)$$

$$C = 0 \quad (7)$$

郊外地

$$a(h_m) = (1.1 \log f - 0.7)h_m - (1.56 \log f - 0.8) \quad (8)$$

$$C = -2\{\log(f/28)\}^2 - 5.4 \quad (9)$$

開放地

$$a(h_m) = (1.1 \log f - 0.7)h_m - (1.56 \log f - 0.8) \quad (10)$$

$$C = -4.78(\log f)^2 + 18.33 \log f - 40.94 \quad (11)$$

## 5. む す び

端末間にて連携を行うシステムを紹介した。続いて、屋外伝送実験の特定コース選定に向けた、京都市街地における受信強度測定を実施した。地図上に測定結果をプロットしたことで、特定の地点における基地局からの受信電力を知ることができた。また、測定された受信強度は秦式の受信強度と概ね一致していることも明らかとなった。この測定結果を基として走行コースを選定し、今後は基地局から端末への伝送を 427 MHz 帯、受信信号の共有に 12.8 GHz 帯を用いた端末連携システムの屋外伝送実験を行っていく予定である。

謝辞 本研究開発は総務省 SCOPE(受付番号 165007006)の委託を受けたものです。

## 文 献

[1] M. Dohler, J. Dominguez, and H. Aghvami, "Link capacity analysis for virtual antenna arrays," Proceedings IEEE 56th Vehicular Technology Conference, vol.1, pp.440-443, Sept. 2002.

[2] H.P. Bui, Y. Ogawa, T. Nishimura, and T. Ohgane, "Performance evaluation of a multi-user MIMO system with prediction of time-varying indoor channels," IEEE Trans. Antennas Propag., pp.371-379, Jan. 2013.

[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," 信学技報, RCS2013-20, pp.159-164, Nov. 2013.

[4] A. Maaref, J. Ma, M. Salem, H. Baligh, and K. Zarifi, "Device-centric radio access virtualization for 5G networks," GLOBECOM 2014 Workshop, pp.887-893, Austin, Texas, Dec. 2014.

[5] H. Kwon and J.M. Cioffi, "Multi-user MISO broadcast channel with user-cooperating decoder," IEEE Vehicular Technology Conference, 2008, pp.1-5, Sept. 2008.

[6] T. Okubo and M. Itamami, "A study on cooperative reception of one segment ISDB-T," 2008 International Symposium on Information Theory and its Applications, ISITA2008, Dec. 2008.

[7] R. Dabora and S.D. Servietto, "Broadcast channels with cooperating decoders," IEEE Transactions on Information Theory, vol.52, no.12, pp.5438-5454, Dec. 2006.

[8] R.G. Gallager, "Low-density parity-check codes," IRE Trans. Inf. Theory, vol.8, no.1, pp.21-28, Jan. 1962.

[9] D.J.C. MacKay, "Good error-correcting codes based on very sparse matrices," IEEE Trans. Inf. Theory, vol.45, no.2, pp.399-431, Mar. 1999.

[10] T. Koike, H. Murata, and S. Yoshida, "Frequency-domain SC/MMSE iterative equalizer with MF approximation in LDPC-coded MIMO transmissions," IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, vol.2, pp.1414-1418, Sept. 2004.

[11] 永野裕規, 村田英一, "端末共同受信に基づく MIMO システムにおける周波数領域繰り返し等化の伝送実験," 信学技報, RCS2014-36, pp.387-391, Mar 2015.

[12] H. Murata and R. Shinohara, "Performance improvement of ZF-precoded MU-MIMO transmission by collaborative interference cancellation," IEICE Communications Express, vol.4, no.5, pp.155-160, May 2015.

[13] 南翔太郎, 永野裕規, 村田英一, "周波数領域繰り返し等化と LDPC 符号を用いた端末共同受信信号処理の特性評価," 信学技報, RCS2015-383, pp.291-296, Mar 2016.