

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：11201

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25709030

研究課題名(和文) 端末に送信機を用いずに並列大容量伝送を実現する超高速負荷変調技術の研究

研究課題名(英文) Study on ultra-fast parallel load-modulation technique achieving large transmission capacity without using transmitter at the terminal

研究代表者

本間 尚樹 (Honma, Naoki)

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号：70500718

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、タグ側に送信機を用いないパッシブMIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 方式について、タグおよびリーダのアンテナの多素子化、多値変調によって、より多くの情報を正確に伝送する方法の確立を目的として検討を行った。多素子アンテナをタグ側に実装したパッシブMIMO伝送装置を試作し、その性能を実験的に評価した。実験的评价から、素子数の増加によって耐雑音特性およびBER特性が大きく改善することが分かった。12×12パッシブMIMO構成とすることによって2.4 Mbits/s以上の伝送速度が実現可能であることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：This study aims and investigates the realization of the passive multiple-input multiple-output (MIMO) technique offering a large data-transmission capacity by using multiple tag-antennas and multi-level modulation, where this system does not use the transmitter at the tag side. The test-bed for the passive MIMO evaluation was developed and its performance was experimentally studied. The experiment indicated that increasing the antennas at tag side improves anti-noise performance and bit-error-rate (BER) significantly. Furthermore, it was found that 12x12 passive MIMO achieves the data-rate higher than 2.4 Mbits/s over the air testing.

研究分野：工学

キーワード：アンテナ

1. 研究開始当初の背景

RFID(Radio Frequency Identification)と呼ばれる中近距離(数 mm~数 m)無線タグを用いた電子マネーや認証管理が実現されており、その端末数も近年劇的に増加している。一方、このように中近距離でありながら、携帯電話のテザリングのように高速な無線データ通信も必要とされている。そのため、RFIDの低消費電力特性を活かした高速な無線データ伝送手段が社会的にも必要とされている。

タグが電源を持たないパッシブタイプのRFIDには負荷変調技術が有用であり、タグ側に送信機が不要という利点がある。負荷変調とは、リーダ(読み取り側)からタグアンテナに向け搬送波を放射し、タグアンテナは終端条件の切り替えによって反射波を変調し、これをリーダが受信することでタグからデータを読み取る技術である[1]。しかし、従来の負荷変調方式は伝送速度が遅いため、画像など大きなデータの伝送には不適であった。

一方、近年 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 技術が登場し、送受信アンテナを複数化し信号の並列伝送によってアンテナ数倍の通信速度を実現する方法が盛んに研究されるようになった[2], [3]。申請者は特に無給電アンテナを用いた MIMO 伝送特性の更なる向上法について検討を行っており[4]、送受信機の無い無給電アンテナで観測される信号を一意的に推定する方法を提案している[5]。通常無給電アンテナは給電アンテナに近接しておかれるが、この方法を応用すると複数の無給電アンテナの終端インピーダンスを変化させ、無給電アンテナに電波を遠隔照射し反射波を読み取ると、同一周波数において複数信号の並列伝送が可能となる。このような伝送方法を、申請者はパッシブ MIMO と呼称している[6]~[8]。

2. 研究の目的

本研究は、このようなパッシブ MIMO 方式について、タグおよびリーダのアンテナの多素子化、多値変調によって、より多くの情報を正確に伝送する方法の確立を目的としている。また、その際に多素子化によってタグのサイズが増加するという問題がある。そのため、タグのサイズが限られる場合を想定し、より少ない素子で高効率な伝送を行う方法についても検討を行う。

具体的には、(a)素子数の増加によるパッシブ MIMO の伝送速度の上限、(b)素子数の異なる同サイズのタグを用いてパッシブ MIMO 伝送の BER(Bit Error Rate)特性の実験的評価、について検討を行った。(a)では素子数、変調多値数を変化させ、パッシブ MIMO の伝送特性を比較し、高速伝送に必要な素子数、変調多値数を実験的に明らかにする。(b)では多素子化に重点を置いた 8 素子タグアンテナと、多値変調に重点を置いた 4 素子タグアンテナとを用いて BER 特性を比較した。これによって、同サイズのタグを用いたパッシブ MIMO 伝送における多素子化と

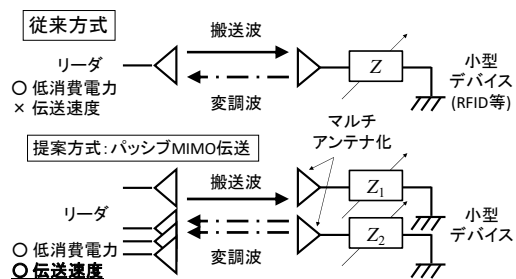


図1. 提案するパッシブMIMO伝送の概念図

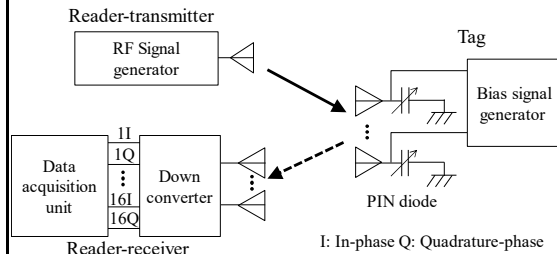


図2. 実験系の概要

多値変調の有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 多素子パッシブ MIMO による高速伝送法

パッシブ MIMO 伝送には負荷変調方式を拡張した方式が用いられる。負荷変調とは、タグ内部の負荷インピーダンスを変化させ、リーダからの搬送波を変調する方式である[1]。図1に負荷変調を用いた RFID システムの概要図を示す。リーダ送信機から送信された搬送波はタグアンテナで反射され、リーダの受信アンテナで反射波を受信する。このとき、タグ内部の負荷インピーダンスを変化させ、搬送波の位相と振幅を制御することで変調を行う。リーダ受信機側では受信信号の位相と振幅の変化からタグ情報を復調することで通信を行うことが可能となる。

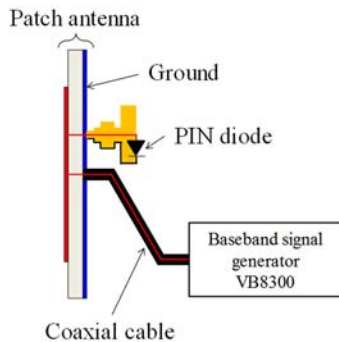
(2) 実験方法

図2に実験環境の概要を示す。信号源 (R&S SMB 100A SIGNAL GENERATOR)から送信された搬送波は複数のタグアンテナで反射され、リーダの受信アンテナで反射波を受信する。タグアンテナには可変抵抗として PIN ダイオード (HVV187-E) を接続しており、NI PXI-6733 の出力電圧によって負荷インピーダンスが制御される。PIN ダイオードの負荷インピーダンスを変化させることで、搬送波の振幅と位相の制御ができるため、リーダ受信機にタグ情報を伝送することが可能となる。リーダ受信機は受信した反射波をダウンコンバータとデータ収録ユニット (DAQ:NI PXIe-6368) で読み取る。PC 上では受信信号の変化からタグの存在と状態を検知し、タグの持つ蓄積データの復調を行い、パッシブ MIMO の伝送特性の評価を行う。

図3にタグアンテナの構成を示す。ここでは、簡単のために単素子のタグアンテナについて説明する。図3(a), (b)はタグアンテナの表面、裏面をそれぞれ示している。パッチアンテナにはバイアス印加用と給電用の 2 つの



(a) 表面 (b) 裏面



(c) タグアンテナ構造の断面図

図3. 実験用タグアンテナの概要

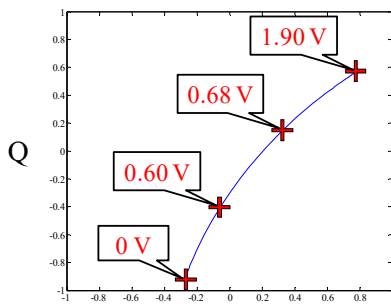


図4. PINダイオードの反射係数

ポートが存在している。バイアス印加用のポートは同軸ケーブルを通してベースバンド信号発生器が接続されている。また、給電用のポートには可変抵抗素子として PIN ダイオードが SMA コネクタ上に装荷されている。図 3(c) にタグアンテナの概要図を示す。ベースバンド信号発生器から出力されたバイアス電圧は同軸ケーブル、パッチアンテナ表面、SMA コネクタを経由し、PIN ダイオードに印加されるバイアス電圧を制御することで瞬時に PIN ダイオードの抵抗値を変化することが可能であるため、負荷変調が可能なタグアンテナとなる。

図 4 に PIN ダイオードの印加電圧に対する反射係数を示す。PIN ダイオードは印加電圧に対して負荷インピーダンスが変化するため、反射係数も印加電圧に対して変化する。本実験では印加電圧を 4 値で切り替えることで反射係数を制御し、負荷変調を行う。

図 5 に素子間隔特性の評価に使用するタグアンテナを示す。使用するアンテナをパッチアンテナとなっており、素子間隔を狭めるために縦長に設計した。素子間隔は 0.5λ , 0.3λ , 0.2λ (λ : 真空中の波長) となっている。

図 6, 表 1 に実験環境, 実験条件をそれぞれ示す。本実験は屋内環境で行っており、リーダー送信機から送信される搬送波の周波数は



(a) 素子間隔 0.5λ



(b) 素子間隔 0.3λ



(c) 素子間隔 0.2λ

図5. 素子間隔特性評価に用いたアンテナ

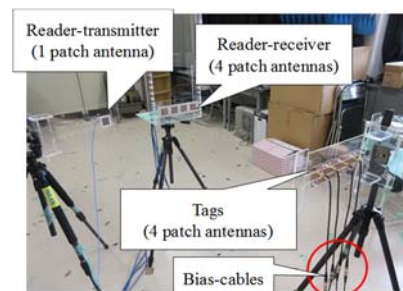


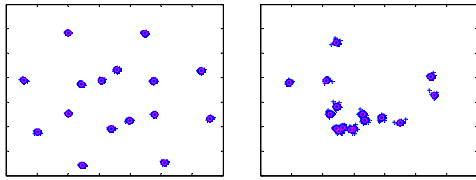
図6. 実験環境

表1. 実験条件

アンテナ	パッチアンテナ
周波数	2.47125 GHz
送信電力	0 dBm
リーダー送信機間距離	0.5 m
リーダー・タグ間距離	1.0 m
タグ, 受信アンテナ数	1, 4
変調多値数	2, 16
伝送速度	400 kBits/s

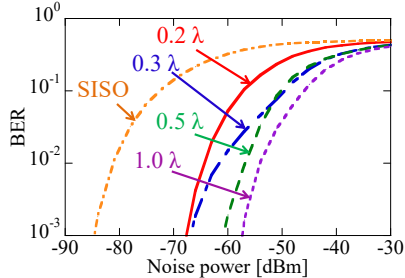
2.47125 GHz として、送信電力は 0 dBm とした。リーダー・タグ間の距離は 0.5 m, 1.0 m で実験を行った。また、MIMO の結果の比較用としてタグ, 受信アンテナ数が 1 である SIS0 (Single-Input Single-Output) でも実験を行った。

図 7 に受信信号のコンスタレーションの一例を示す。図中の円は理想的な受信信号点, 十字は雑音を含んだ受信信号点を表している。理想的な受信信号点は 16 個存在しており, 1 つのシンボルで 4 ビットの情報を持っている。図 7(a) に素子間隔が 0.5λ の受信信号のコンスタレーションを示す。図から受信信号の相関が低く, 一様に受信信号が分布していること

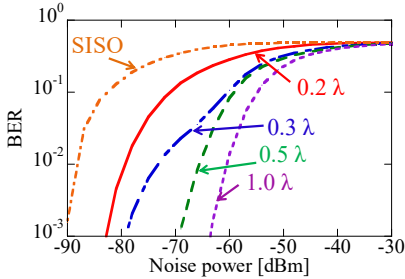


(a) 素子間隔 0.5λ (b) 素子間隔 0.2λ

図7 受信信号点のコンスタレーション



(a) リーダ・タグ間距離 0.5 m



(b) リーダ・タグ間距離 1.0 m

図8. BERの雑音電力特性

が確認できる. 図 7(b)に素子間隔が 0.2λ の受信信号のコンスタレーションを示す. 素子間隔が 0.5λ の受信信号と比較すると, 受信信号の相関が高く, 中央に集中して分布していることが確認できる. これは素子間の結合の影響によって空間相関が上昇しているためであり, 復調精度の劣化の原因となる.

4. 研究成果

(1) 素子間隔に対する伝送性能評価

図 8 にタグ素子間隔ごとの BER 対雑音電力の結果を示す. 雑音電力は実験後のポスト処理によって可変となっており, 対雑音性の評価を可能としている. 図 8(a)にリーダ-タグ間距離 0.5 m の結果を示す. $BER=10^{-3}$ を基準とすると素子間隔が狭い場合(素子間隔 0.2λ), パッシブ MIMO は SISO と比較して対雑音性が約 17 dB 改善していることが分かる. 図 8(b)にリーダ-タグ間距離 0.5 m の結果を示す. 同様にパッシブ MIMO と SISO を比較すると, 対雑音性が約 7 dB 改善することが分かる. これは, パッシブ MIMO が狭いタグ素子間隔でも高精度な高速伝送を実現可能であることを示している.

(2) 多素子パッシブ MIMO による高速伝送

図 9 に多素子パッシブ MIMO の実験に用いるタグアンテナを示す. 使用するアンテナはパッチアンテナとなっており, 中心周波数は 2.47125 GHz として設計している. 16 素子の

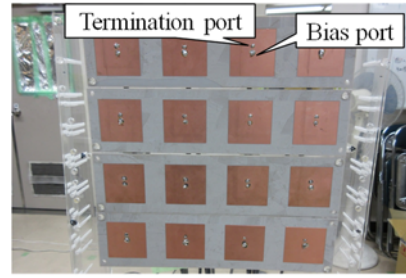


図9. 16素子タグアンテナ

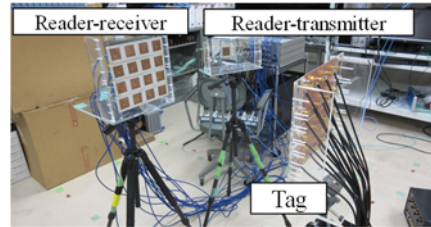


図10. 実験環境

表2. 実験条件

アンテナ	パッチアンテナ
周波数	2.47 GHz
送信電力	0 dBm
リーダ送受信機間距離	0.5 m
リーダ・タグ間距離	1.0 m
アンテナ高	1.0 m
タグ, 受信アンテナ数	1, 2, 4, 8, 12, 16
変調多値数	2, 4, 8, 16

アンテナを素子間隔 0.5λ で配置しており, 制御するタグアンテナ数を可変とすることで, 多素子パッシブ MIMO の実験を可能とする.

図 10, 表 2 に実験環境, 実験条件をそれぞれ示す. 本実験は屋内環境で行っており, リーダおよびタグアンテナはパッチアンテナを使用している. リーダ送信機から送信される搬送波の周波数は 2.47125 GHz として, 送信電力は 0 dBm とした. リーダ-タグ間の距離は 1.0 m となっている. 受信アンテナ数, タグアンテナ数は 1 から 16 まで変化させながらそれぞれ実験を行っている. 変調多値数は同伝送速度で評価を行うために, タグアンテナ数に応じて変更している.

図 11 に BER 対雑音電力の結果を示す. 図 11(a)に伝送速度 0.8 Mbits/s のときの BER 特性を示す. 雑音電力が -90 dBm のとき素子数にかかわらず $BER=10^{-2}$ 以下であり, 精度良く通信が可能であることが分かる. しかし, SISO は 4×4 MIMO と比較すると, 対雑音性に約 20 dB の差があることから多素子化により精度の高い通信が可能であることが明らかとなった. 図 11(b), (c)に伝送速度 1.6 Mbits/s, 2.4 Mbits/s のときの BER 特性をそれぞれ示す. この結果から, 素子数の増加によって対雑音性が改善していることが分かる. 図 11(d)に伝送速度 3.2 Mbits/s の結果を示す. 図から, 素子数を変化させても $BER=10^{-2}$ 以上となり, 精度のよい通信が困難になることが確認できる. これは素子数, 変調多値数の増加により,

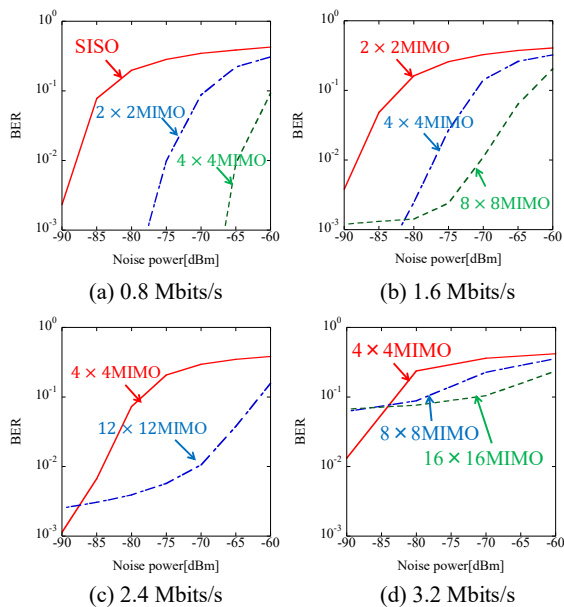


図11. 伝送速度ごとのBERと雑音電力の関係

受信信号の相関が高くなるため復調精度が劣化したためである。しかしながら、図11(d)では雑音電力を下げることによってBERが改善する傾向が見られることから、リーダーから照射する送信電力を向上させることによって、伝送速度3.2 Mbits/sの達成が可能であることが期待できる。

(3) 研究成果のまとめ

本研究では、パッシブMIMOにおける素子間隔特性と最高伝送速度を明らかにした。素子間隔特性の実験的評価から、タグ素子間隔がBER特性に大きな影響を与えることが分かった。リーダー-タグ間距離が0.5 m、BER=10⁻³を基準として評価すると、パッシブMIMOはSISOと比較して非常に狭いタグ素子間隔の場合においても耐雑音性が17 dB改善することを確認した。これより、パッシブMIMOによって伝送距離を伸長することが可能であることが分かった。また、最大伝送速度の実験的評価から、素子数の増加によってBER特性が大きく改善することが分かった。また、12×12パッシブMIMOによって最大伝送速度2.4 Mbits/sを実現可能であることが明らかになった。

<引用文献>

- [1] R. Want, "An introduction to RFID technology", IEEE Pervasive Computing, vol. 5, no. 1, Jan.-March 2006
- [2] G. J. Foschini, et al. "Capacity when using diversity at transmit and receive sites and the Rayleigh-faded matrix channel is unknown at the transmitter," in Proc. WINLAB Workshop on Wireless Information Network, Mar. 1996.
- [3] M. A. Jensen, et al. "Antenna design for mobile MIMO systems," IEICE Transactions on Communications, vol. E91-B, no. 6, pp. 1705-1712, June 2008.
- [4] N. Honma, et al. "A stochastic approach to design MIMO antenna with parasitic elements based on propagation characteristics," IEICE

Trans. Commun., Vol.E93-B, No.10, pp.2578-2585, Sep. 2010

- [5] Naoki Honma, et al. "Fast control method of parasitic antennas using non-iterative algorithm in multi-antenna system," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.60, No.4, pp.2044-2051, Apr. 2012
- [6] K. Terasaki and N. Honma, "Feasible load modulation technique using multiple antenna systems," IET Journals Electronics Letters, Vol.48, No.18, pp.1090-1091, Aug.2012
- [7] K.Terasaki, K.Kinami and N.Honma, "Passive MIMO transmission using load modulation," 2012 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2012), Electric Proc. of ISAP 2012, POS2-27, Oct. 2012
- [8] K.Terasaki and N.Honma, "Experimental study on passive MIMO transmission," 2012 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2012), Electric Proc. of APMC 2012, 4B3-08 1031-1033, Dec. 2012

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計11件)

- ① Ryota Takahashi, Keisuke Terasaki, Kentaro Murata, Naoki Honma, and Yoshitaka Tsunekawa, "Fast demodulation method for passive MIMO communication by using beam-forming at receiver," IEICE Communications Express, 査読有, Vol.4, No.8, pp.258-263, Aug. 2015
DOI:10.1587/comex.4.258
- ② Naoki Honma, Hiroshi Sato, Koichi Ogawa, and Yoshitaka Tsunekawa, "Accuracy of MIMO Channel Capacity Equation Based only on S-parameters of MIMO Antenna," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., 査読有, Vol. 14, pp.1250-1253, Jun. 2015
DOI:10.1109/LAWP.2015.2400474
- ③ Takuma Ito, Naoki Honma, Keisuke Terasaki, Kentaro Nishimori, and Yoshitaka Tsunekawa, "Interference suppression method between primary broadcasting and secondary systems using load modulation," IEICE Trans. Commun., 査読有, Vol.E98-B, No.5, pp.861-869, May 2015
DOI:10.1587/trancom.E98.B.861
- ④ Keisuke Terasaki and Naoki Honma, "Experimental evaluation of passive MIMO transmission with load modulation for RFID Application," IEICE Trans. Commun., 査読有, Vol.E97-B, No.7, pp.1467-1473, Jul. 2014
DOI:10.1587/transcom.E97.B.1473

[学会発表] (計64件)

- ① 高橋亮太, 本間尚樹, 恒川佳隆, "パッシブMIMOの素子間隔に対するBER特性の評

- 価,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-135, 2015/9/9, 東北大学(宮城県)
- ② 本間尚樹, 齋藤公利, 恒川佳隆, “MIMO アンテナ S パラメータの非接触推定法,” 電気関係学会東北支部連合大会, 2G10, 2015/08/28, 岩手県立大学(岩手県)
- ③ 高橋亮太, 寺崎圭祐, 本間尚樹, 恒川佳隆, “パッシブ MIMO の素子間隔特性の実験的評価,” 電気関係学会東北支部連合大会, 2G11, 2015/08/28, 岩手県立大学(岩手県)
- ④ Naoki Honma, Takuma Ito, Kentaro Nishimori and Yoshitaka Tsunekawa, “Can TV and communication system coexist in same frequency band? -applying back-scattering technique to TV receiver antenna-,” 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting (AP-S 2015), pp.2243-2244, 2015/7/22, The Westin Bayshore (カナダ)
- ⑤ Naoki Honma, Ryota Takahashi and Yoshitaka Tsunekawa, “On the Transmission Speed of Passive MIMO with Large Number of Antennas,” 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, MO-A5.1P.9, pp.337-338, 2015/6/27, El Conquistador Resort (プエルトリコ)
- ⑥ Ryota Takahashi, Keisuke Terasaki, Naoki Honma and Yoshitaka Tsunekawa, “Evaluating Impact of Tag Element Spacing on Bit-error-rate Performance Using Passive MIMO Testbed,” 2014 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2014), TH3A, pp. 285-286, 2014/12/4, Grand Hi-Lai Hotel, Kaohsiung (台湾)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本間 尚樹 (HONMA, Naoki)

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号 : 70500718