

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04182

研究課題名(和文) 導波路協調型二次元通信の基礎研究とIoTセンサシステムへの応用

研究課題名(英文) Research on cooperation between transceiver and two-dimensional waveguide and its application to IoT sensor systems

研究代表者

野田 聡人(Noda, Akihito)

高知工科大学・システム工学群・准教授

研究者番号：60713386

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、シート状の薄い導波路を用いて電磁波を伝送する二次元通信においては、この導波シートに単なる伝送路以上の機能を組み込む余地がある点に着目した。成果の一例として、通信端末から高周波の発振回路・増幅回路を取り除いた低消費電力(約1mW)の回路で、導波路中に供給されている搬送波(2.4GHz, 10dBm)を反射して通信を行うbackscatter通信で3Mb/sの通信速度を達成した。また、導波路への接触導通を介した通信システムの大面積化に向けて、その静電容量の増大によるローパス特性のカットオフ周波数低下という問題に対し、導波路側に負性容量回路を接続することによってこれを改善する手法を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1mW程度の消費電力で3Mb/s程度の通信が可能であることを示したことで、二次元導波路上でのワイヤレス給電方式との併用により、バッテリーレスのIoT端末が導波路上に分散して連続動作させることが現実的に可能と期待される。バッテリーを搭載し定期的に充電が必要な電子機器としてでなく、身の回りにメンテナンスフリーで配置される小型センサ群による高度なIoT環境の実現などの可能性を拓く成果である。

研究成果の概要(英文)：This research focused on the fact that in two-dimensional communications, where electromagnetic waves are transferred via a waveguide sheet, more functionalities can be embedded into the waveguide. As an example of our achievement, a prototype backscatter transmitter circuit achieved 3 Mb/s data rate, while RF oscillators and RF amplifiers were eliminated from the circuit, and a carrier wave (2.4 GHz, 10 dBm) was supplied in a waveguide sheet. In addition, we found a method to mitigate the degrading lowpass cutoff frequency of the larger waveguide sheet by connecting a negative capacitance circuit to the waveguide side.

研究分野：電磁波工学

キーワード：二次元通信

1. 研究開始当初の背景

本研究で扱う二次元通信とは、主にマイクロ波帯の電磁波をシート状の導波路に沿って伝搬させ、シート表面に生じるエバネセント場を介して導波路とそれに近接する送受信機とが電磁的に結合して通信を行う形態である。これまで、主に 2.4GHz ISM バンドを含むマイクロ波帯での研究が行われてきた。

図 1 は、典型的な無線通信システムと従来の二次元通信システム、および本研究で想定する二次元通信システムのブロック図である。無線通信システムでは、ベースバンド (BB) 信号によって搬送波を変調した信号が、アンテナから電磁波として空間に送出される。従来の二次元通信システムでは、電磁波を空間中に放射するのではなく二次元導波路に沿って伝搬させること、そのために空中に放射するアンテナではなく導波路の導波モードと効率よく結合する近接カプラを用いることが、通常の無線通信と異なる点であった。通信端末としては通常の無線通信機器からアンテナを取り外して代わりに近接カプラを取り付けただけであり、変復調方式や物理層より上位のレイヤーのプロトコルは無線通信のものをそのまま流用した。それが導波シート上でのみ通信できるという性質によって、他の通信系と干渉しにくく、周波数資源の再利用性を高めるという有用性をもたらした。放射強度を微弱無線局レベルまで低減し、広帯域を占有しての高速通信も可能である。

しかし、二次元通信の特徴は単に空間への放射が小さいということだけでなく、「電波の伝搬環境が導波路の設計によりある程度『管理』できる」という点こそが重要であり、そこに着目した通信アーキテクチャの設計を研究するべきである、という思想から本研究を実施した。

まず、従来の二次元通信システムの通信機が備えるコンポーネントのうち、搬送波の発振器を通信機から取り除き導波路側に持たせるといった構成が考えられる (図 1(c))。搬送波を外部から供給して送信器はそれを反射する強度・位相などによって変調を行うというアプローチは、広く普及しているパッシブ型の RFID (radio frequency identification) タグや交通系 IC カードでも利用される NFC (near field communication) などですでに実績のある手法である。一方で、センサネットワーク等のための各通信端末の電力を低減する通信方式として近年でも新たな提案が通信系のトップレベル国際会議で発表されるなど、基礎研究としての意義は未だに失われていない。

2. 研究の目的

上述の方針による新たな二次元通信のアーキテクチャによって、送受信機の構成要素を削減し、センサ素子の本来の小型・低電力性を損なわない、小型・低電力の通信モジュールが実現可能になると期待できる。本研究ではこれを実現することを目的とした。

この目的のために寄与する二次元通信の特徴は、上記以外にも以下のようなものがある。二次元導波路の導波モードは導波路表面からの距離に対して電磁界強度が指数減衰するエバネセント場を伴うが、放射場は非意図的に生じるものであって本質的に放射場に依存しない通信である。したがって放射場を十分に低減する対策を施したうえで、広い周波数帯域幅を占有した高速通信が可能である。QAM (quadrature amplitude modulation) のような多値変調によって高ビットレートの変調信号を狭帯域に詰め込むといった、回路的な高機能化の必要性はなく、変復調回路の単純化と低消費電力化を優先したシステム構成を採用することができる。

また、近接カプラの小型化のためには搬送波の高周波数化が一つの方針であるが、以下のように別のアプローチも考えられる。現在までに、ウェアラブル用途への展開を目的として、導電繊維を用いて構成した布製の導波路にデバイスを突き刺して接触導通する利用形態を研究代表者

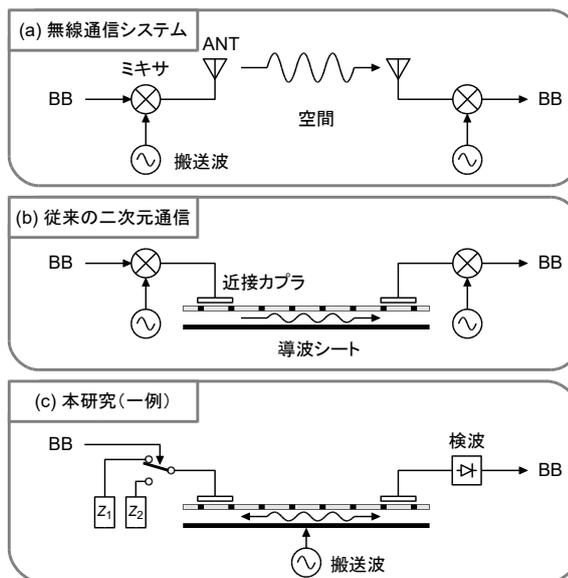


図 1: (a)通常の中での無線通信システム. (b)送受信器の基本構成は変化させず、電波の伝搬経路を二次元導波路としただけの二次元通信システム. (c)本研究では一例として、送信器が高周波の発振器・増幅器を持たない backscatter 通信を、導波路側に搬送波発振器を組み込むことで実現する。

が考案し、研究を行っている。この形態では電氣的な導通によって送受信機と導波路の間で直接伝導電流が流れるため、電磁波の半波長や 1/4 波長といった大きさの共振器をカップリング構造として用いることなく kHz, MHz オーダーの低い周波数帯の信号も伝送可能である。

3. 研究の方法

上述のように、本研究の目的に沿った最も基本的な実装例は、二次元導波路上での backscatter 通信であり、まずこのプロトタイプの開発と評価を実施した。2.4GHz ISM 帯を使用することとし、backscatter 変調・復調回路を市販電子部品の組み合わせで実装しながら低消費電力で実現することを目標とした。このため、変調方式は単純な振幅偏移変調 (ASK) とした。Backscatter 通信のために導波路には常時搬送波信号が供給されているため、受信器は常時この搬送波を最も強く受信している状態であり、これと送信器からの backscatter 信号を分離することが課題となる。解決策として、backscatter 送信機で 10MHz 程度の副搬送波を発生させ、受信器では搬送波とこの副搬送波を SAW フィルタによって分離する方式を着想した。

また、先述の通り、導波路に対して接触導通する方式によって小型な送受信器を実装する形態についても、導波路側への機能埋め込みによる通信特性改善の研究を行った。この形態では、本質的に大きな制約となるのは、導波路面積に比例して増大する静電容量に起因する、導波路のローパスカットオフ周波数の低下である。このカットオフ周波数以上の通信は、信号の減衰、波形歪みが顕著となる。導波路側に新たな回路要素を接続することにより、この問題を軽減する手法について研究を行った。

4. 研究成果

成果の一例として、通信端末から高周波の発振回路・増幅回路を取り除いた低消費電力 (約 1mW) の回路で、導波路中に供給されている搬送波 (2.4GHz, 10dBm) を反射して通信を行う backscatter 通信で 3Mb/s の通信速度を達成した (図 2)。

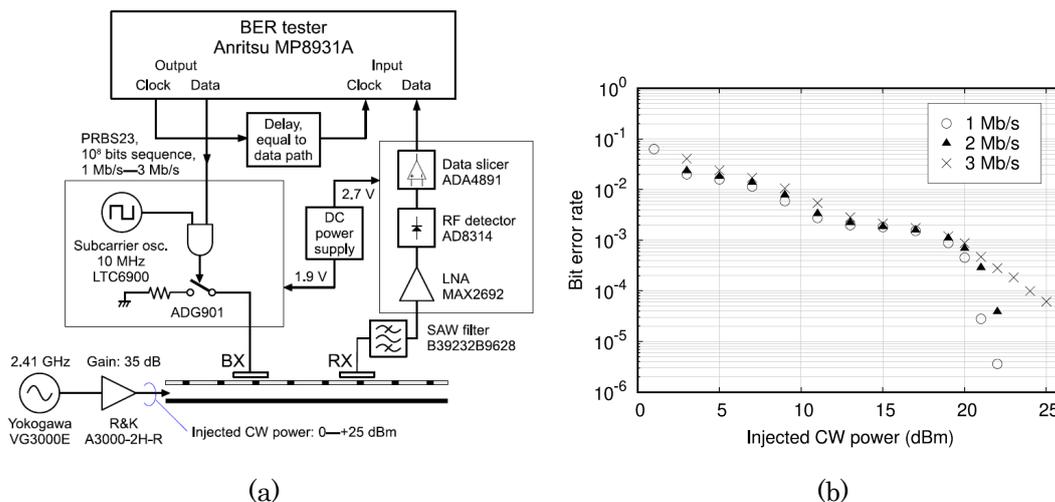


図 2: (a) Backscatter 通信の実験系。Backscatter 送信機のベースバンド信号として BER テスタの PRBS 出力を用いて、受信器復調結果との間で BER を評価した。導波路に入力する搬送波の信号強度を 0~+25dBm で変化させ、PRBS のデータレートを 1, 2, 3 Mb/s とした場合についての BER を (b) に示す。

また、導波路への接触導通を介した通信システムの大面積化に向けて、その静電容量の増大によるローパス特性のカットオフ周波数低下による伝送波形歪みの問題について、理論的側面から検討を行った。その結果、この通信システムにおけるパルス波形の伝送路の本質は図 3 の回路モデルに帰着されることを明らかにした。さらに、ダンピング抵抗および電源デカップリングインダクタを、伝送路の静電容量に合わせて適切に選択することで、この回路モデルにおいて受信される電圧波形が伝送路静電容量によらず一定となることを解析的に明らかにした。ただしこのモデルでは伝送路の抵抗が無視されており、これが無視できる条件が満たされている

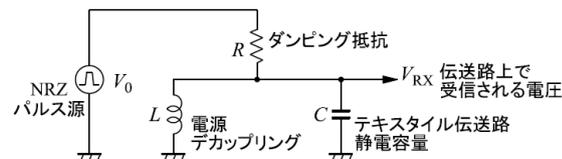


図 3: 接触導通型二次元通信の交流等価回路。

ことが前提となる。

抵抗が無視できない場合においてもカットオフ周波数低下の問題を軽減するために、導波路側に負性容量回路(図4)を接続することによってこれを改善する手法を見出した。

以上のように、これまで単なる電磁波の伝搬経路としての役割しか果たしていなかった二次元通信伝送路に対し、搬送波給電回路や負性容量回路といった新たな機能要素を付加することで、その導波路上で動作する二次元通信端末の小型化・高機能化が達成されることを示した。

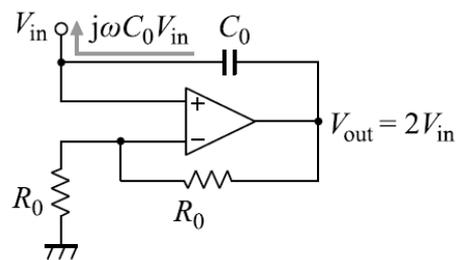


図 4: オペアンプを用いた負性容量回路の実装。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Noda Akihito	4. 巻 11
2. 論文標題 Backscatter communication on 2-D waveguides	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 75 ~ 79
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2021XBL0190	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Noda Akihito	4. 巻 11
2. 論文標題 Multi-channel FM transmission of vibrotactile signals on 2-D communication textile	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 195 ~ 201
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2021XBL0224	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計26件（うち招待講演 2件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 野田 聡人
2. 発表標題 導電布伝送路上での容量結合型シリアル通信
3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野田 聡人
2. 発表標題 両面導電媒体による二次元通信：直流・パルス・マイクロ波の伝送と応用
3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野田 聡人
2. 発表標題 フレキシブルコイル間のParity-Time対称ワイヤレス電力伝送
3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前田 耀斗, 野田 聡人
2. 発表標題 身体表面センサネットワークのためのマルチアンテナシステム
3. 学会等名 第40回計測自動制御学会センシングフォーラム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野田 聡人
2. 発表標題 導電テキスタイル上の交流結合パルス伝送の波形不変条件
3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 前田 耀斗, 野田 聡人
2. 発表標題 身体表面に展開するMIMOシステムのチャネル相関評価
3. 学会等名 2024年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 義本卓叶,野田聡人
2. 発表標題 SDRで生成する多チャンネル触覚刺激波形のFM伝送
3. 学会等名 2024年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 野田聡人,杉浦準哉
2. 発表標題 負性容量を用いた導電テキスタイル二次元通信の面積化
3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 野田聡人
2. 発表標題 導電布を用いた柔軟タッチインタフェース
3. 学会等名 電子情報通信学会 短距離無線通信研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野田聡人
2. 発表標題 送信キャリア周波数の変動に追従するFMレシーバ
3. 学会等名 電子情報通信学会 短距離無線通信研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野田聡人
2. 発表標題 導電布伝送路上でのアナログ波形の多チャンネル同時送信
3. 学会等名 電子情報通信学会 短距離無線通信研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野田聡人
2. 発表標題 導電布二次元伝送路上での多チャンネルアナログ波形の送信
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野田聡人
2. 発表標題 UHF帯RFID微小タグの応答性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 短距離無線通信研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野田聡人
2. 発表標題 身体表面分散型システムのための柔軟二次元伝送路上の給電と通信
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野田聡人
2. 発表標題 二次元導波路上で動作するバッテリーレスBackscatter 送信器
3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信研究会2021年度11月研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野田聡人
2. 発表標題 留め具不要の二次元通信テキスタイル用コネクタ
3. 学会等名 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水宥貴, 野田聡人
2. 発表標題 ポケット内のモバイル機器の充電のための ベルト型ウェアラブル無線給電システム
3. 学会等名 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永井一生, 野田聡人
2. 発表標題 二次元通信タイルを用いたUHF帯RFIDタグ位置検出システム
3. 学会等名 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野田聡人
2. 発表標題 ウェアラブル触覚呈示スーツのための柔軟二次元伝送路上での振動波形 の多チャンネルアナログ伝送
3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信研究会2021年度1月研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野田聡人
2. 発表標題 導電布を用いた柔軟タッチインタフェース
3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信研究会2022年度6月研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野田聡人
2. 発表標題 送信キャリア周波数の変動に追従するFMレシーバ
3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信研究会2022年度8月研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野田聡人
2. 発表標題 導電布伝送路上でのアナログ波形の多チャンネル同時送信
3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信研究会2022年度11月研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野田 聡人
2. 発表標題 導電布二次元伝送路上での多チャンネルアナログ波形の送信
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野田 聡人
2. 発表標題 UHF帯RFID 微小タグの応答性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会短距離無線通信研究会2022年度1月研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野田 聡人
2. 発表標題 微小電力でのデータ送信を可能とするBackscatter二次元通信
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野田 聡人
2. 発表標題 IoTスペースのためのbackscatter方式二次元通信
3. 学会等名 電子情報通信学会 短距離無線通信研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------