

# 単一の周波数を利用して電力供給とデータ伝送を同時に行う 二次元通信センサネットワーク

松田 隆志<sup>†</sup> 門 洋一<sup>†</sup> 太田 敏史<sup>†</sup> 張 兵<sup>†</sup>

<sup>†</sup>独立行政法人 情報通信研究機構

〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2-2

E-mail: <sup>†</sup> {matsuda, kado, oota, zhang}@nict.go.jp

**あらまし** 二次元通信は、面状の電磁波伝送媒体を介して通信と電力伝送を同時に行えるシステムである。これまでに数ワットの電力を効率よく送信するための手法として、複数の入力点から1点に電力を集中する方法を提案した。この方式はシート上に置かれた端末からのパイロット信号を用いて、各電極から送信する電磁波の位相を調節し、パイロット信号を送信した端末に電力を集中している。本研究では、複数のノードに電力を送信する場合に、時分割で交互に電力を送信する方式と、両方のノードになるべく多くの電力を与える位相に調節して送信する方式を提案し、各方式の効率を実測し、評価を行った。

**キーワード** 二次元通信, ワイヤレス電力伝送, 位相調節

## Two-dimensional Sensor Network Using Single Channel for Power and Data Transmission

Takashi MATSUDA<sup>†</sup> Youiti KADO<sup>†</sup> Toshifumi OOTA<sup>†</sup> Bing ZHANG<sup>†</sup>

<sup>†</sup> National Institute of Information and Communications Technology

2-2-2 Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto, 619-0288 Japan

E-mail: <sup>†</sup> {matsuda, kado, oota, zhang}@nict.go.jp

**Abstract** The two-dimensional communication is a novel physical form of communication that utilizes the surface as a communication medium to provide data communication and contactless power transmission service to the device. The method of concentrating the electric power from two or more inputs to one point was proposed as technique to transmit the large power. This scheme uses pilot signal from the device on the 2D sheet and adjust phases of inputs to concentrate power. In this paper, to transmit power for multiple devices on the 2D sheet, we propose two schemes; time-division method and phase adjustment method. We evaluate performances of these schemes by realistic measurement of received power of the devices.

**Keyword** Two-dimensional Communication, Wireless Power Transmission, Phase Control

### 1. はじめに

二次元通信は、面状の伝送媒体（二次元通信シート）を介して、通信と電力供給を行うシステムである。二次元通信では、通信シート上に端末を置くだけで通信可能であり、従来の有線のような煩雑な配線が不要となる。また、通信シート内に電磁波を閉じ込めるので、空間への電波漏洩が小さく無線よりもセキュリティ性が高いといった特徴がある。このように二次元通信は有線と無線の利点を併せ持った特徴を持つ通信技術である。また、通信シートに柔軟な素材を用いることで場所を選ばず設置できることから、幅広いアプリケーションに適用できることが期待されている。例えばロボットの表面や内部に通信シートを貼りつけておくことで、任意の場所にセンサ端末を設置することが可能

であり、煩雑な配線から解放される。また、電磁波が空間に漏れることはないので、複数のチャンネルを使用することが可能で、低遅延で高速な通信も可能である。面状の通信媒体を用いた研究は、これまでも行われており、Networked surface[1]や Pushpin[2]といった様々ものがある[3-5]。

この二次元通信シートの特徴の一つである電力供給は、アプリケーションの利便性を高める上でも重要な技術である。二次元通信シートによって効率的に電力を伝送するためには、電磁波を通信シートに満遍なく伝播させるのではなく、端末が置かれる場所だけに集中することが望ましい。これまでの研究では、一つの端末に対して電力を集中するためのシステムとして、複数の電極から送信する電磁波の位相を調節すること

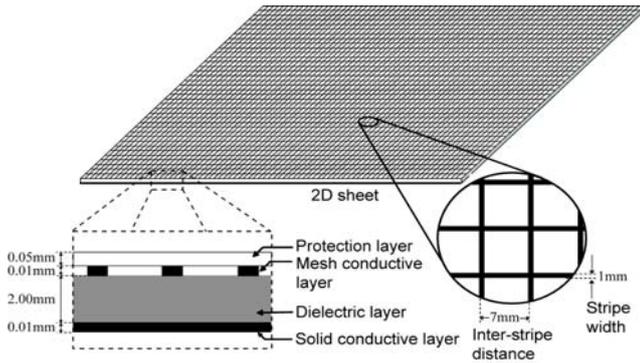


図1 二次元通信シートの構造

Fig. 1 2D sheet construction.

で電力を一点に集中する方式が提案されている[6]. これはシート上に置かれた端末がパイロット信号を送信し、電極がこのパイロット信号を受信する. 受信したパイロット信号の位相を計測し、この位相を符号反転して電力信号を送ることでパイロット信号を送信した端末へ電力伝送を集中することができる.

本研究では、複数の端末が置かれた場合に、効率よく送信する手段として、二つの方式を提案する. ひとつは各端末への集中電力伝送を時分割で切り替えながら送信する方式である. この方式では、端末が必要な電力が異なる場合に、調節しやすいという利点がある. しかし、端末によって最適な位相が異なるため、切り替え時間のオーバーヘッドが存在する. もうひとつの方法は、両方同時に大きな電力が得られる位相を推定し、常にその位相で送信し続ける方法である. この方式では時分割のような切り換えのオーバーヘッドはない. 本稿では、これら二つの方式について実測実験を行い、提案する方式の性能を比較、評価する.

## 2. 二次元通信システムの概要

二次元通信システムは、二次元伝播する電磁波を二次元通信シートに閉じ込め、近接カップラが通信シートに電磁近接結合することにより、通信と電力供給を行う. 図1に導電層、誘電層、メッシュ導電層、保護層の4層からなる二次元通信シートの構造を示す. メッシュ導電層や底面の導電層はアルミニウム、誘電層はポリスチレンなどの発泡体や樹脂板など安価な素材によって実現可能である. 保護層は、メッシュ導電層に直接触れないように保護するためのものである. この階層構造によって、誘電層と導電層の誘電率の関係から二次元通信シート内に電磁波を閉じ込めることが可能である. また、本研究で用いた二次元通信シートは2.4GHz帯の電磁波にあわせて、メッシュの幅を1mmとし、メッシュの間隔を7mmとしている.

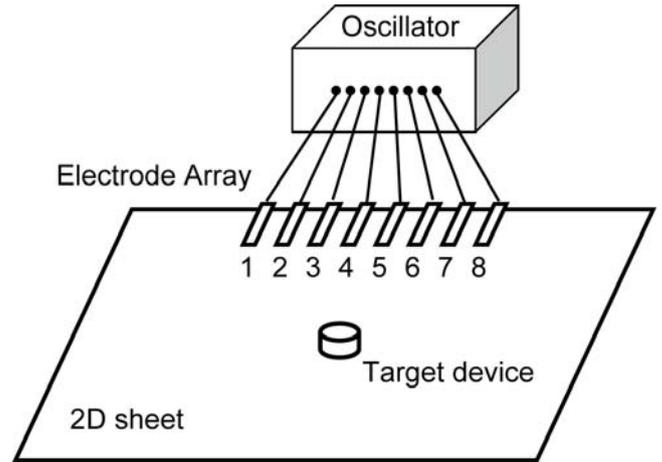


図2 電力供給システムの概要

Fig. 2 The outline chart of the power supply system

## 3. 位相制御による電力集中方式

本章では、複数電極からの1つの端末への電磁波の位相制御による電力集中方式について説明する. 図2は電力集中システムの概要を示している. 電力を送信するための電極は通信シートの一端に等間隔に設置される. シート上に端末を配置したとき、端末から電極  $n$  までの電磁波は次式で表される.

$$f(x_n, t) = A(x_n) \exp^{i(kx_n - \omega t + \theta_n)} \quad (1)$$

ここで、 $A(x_n)$ は電磁波の振幅であり、ノードと電極  $n$  との到達距離  $x_n$  に依存する. また  $k$  は波数、 $\omega$  は角周波数、 $t$  は時刻、 $\theta_n$  は初期位相を表している. このとき  $N$  本の電極から端末への合成波は次のようになる.

$$g(x, t) = \sum_{n=1}^N A(x_n) \exp^{i(kx_n - \omega t + \theta_n)} \quad (2)$$

時刻  $t$  は全て等しいので、各和の要素の  $kx_n + \theta_n$  が全て等しいとき、合成波の振幅は最大となる. つまり、一つの端末に対しては、初期位相  $\theta_n$  を調節することで、電力を集中させることができる.

文献[6]では端末からパイロット信号を送信して、各電極で同時に位相を測定することによって、電極でのパイロット信号の位相のずれを測定している. この位相のずれを打ち消すように電力伝送の電磁波の初期位相を調節する(測定した位相を符号反転する)ことによって、端末で位相がちょうど重なり合うように電磁波を送信することが可能である.

## 4. 複数端末への電力伝送

次に、複数端末への電力伝送について考える. 複数端末へ伝送方法について二つの方式を提案する. 一つは時分割による電力伝送方式、もう一つは複数端末に最適化した位相制御による電力伝送方式である.

#### 4.1 時分割切り替えによる電力伝送方式

シート上に置かれた複数の端末に対して電力供給を行う方法として、それぞれの端末に最適化した位相設定を行い、時分割で最適化対象となる端末を切り替えていく方法が考えられる。

時分割方式では端末ごとに割り振る時間を任意に設定可能である。もし、ある端末 A に位相最適化したときの全ての端末での総受信電力が、他の端末に位相最適化した場合の総受信電力より大きいとする。このとき端末 A に位相最適化し電力を送信し続けることが全体では最大の電力伝送となる。しかし、各端末の受信電力には大きな差が生まれる。そこで、最大と最小の差の許容範囲を決める必要がある。

$q$  台の端末  $Q_u$  ( $u=1,2,\dots,q$ ) があるとき、それぞれの端末に最適化した位相で電力伝送を行う割合を  $t_u$  ( $t_1+t_2+\dots+t_q=1$ )、 $q$  台の端末の  $Q_u$  がそれぞれ受電する電力を  $w_u$  としたとき、

$$t^T = [t_1, t_2, \dots, t_q] \quad (3)$$

$$w^T = [w_1, w_2, \dots, w_q] \quad (4)$$

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^2 & \cdots & \alpha_{q1}^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{1q}^2 & \cdots & \alpha_{qq}^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

とすると、 $w=At$  であるから、

$$t = A^{-1}w \quad (6)$$

となる。端末の受信電力の最大値と最小値の比を許容するばらつきを変数  $x$  として与え、 $t_u > 0$ 、 $\max(w_1, \dots, w_q)/\min(w_1, \dots, w_q) \leq x$  を満たし、 $w_u$  の総和が最大となる  $t$  を求める。

#### 4.2 複数端末に最適化した位相制御による電力伝送方式

もうひとつの複数端末への効率的な電力伝送方式として、全ての端末が同時にある程度の受信電力を得られる位相に調節する方式が考えられる。

各端末からのパイロット信号により各電極から各端末へ送信される電磁波の位相のずれと受信電力を得ることができる。そこで、式(1)から電極から送信する電磁波の初期位相を変化させた場合に合成波がどのように変化するかを推定することができる。

$p$  個のプラグ  $P_v$  ( $v=1,2,\dots,p$ ) の位相設定を  $\phi_v$  とすると、 $q$  台の端末  $Q_u$  に到達する合成波は、

$$\sum_{v=1}^p (a_{vu} (\cos(\omega t + \phi_v - \theta_u) - \sin(\omega t + \phi_v - \theta_u)j)) \quad (7)$$

となる。端末  $Q_u$  が受電する電力  $w_u$  は、

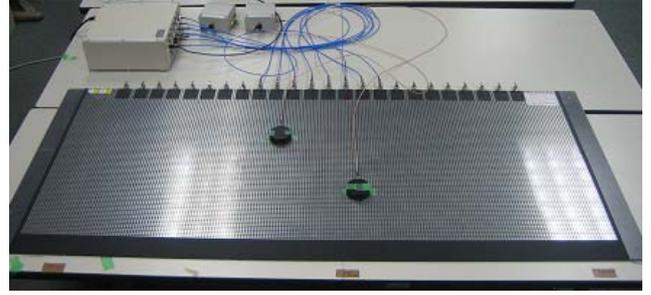


図3 実験のセットアップ

Fig. 3 Measurement setup



図4 パイロット信号送信用端末

Fig. 4 Client node for pilot signal transmission

$$w_u = \left| \sum_{v=1}^p (a_{vu} (\cos(\phi_v - \theta_u) - \sin(\phi_v - \theta_u)j)) \right|^2 \quad (8)$$

と表せる。ここで、時分割切り替えによる最適化と同様、端末の受電電力の最大値と最小値の比を許容するばらつきの変数  $x$  を与え、 $\max(w_1, \dots, w_q)/\min(w_1, \dots, w_q) \leq x$  を満たし、 $w_u$  の総和が最大となる  $\phi$  を反復探索により発見する。

## 5. 評価実験

### 5.1 実験システム構成

実験に用いたシステムは、二次元通信シート、位相可変電力伝送装置、小型電極アレイ、パイロット信号送信端末から構成される(図3)。位相可変電力伝送装置は8個の送受信ポートを備えており、受信した信号の位相を1度単位で、また受信電力を約1dBm単位で測定することができる。また送信電磁波の位相も1度単位で任意に調節することが可能である。この位相可変電力伝送装置の送受信ポートと小型電極コネクタを同軸ケーブルで結線する。小型電極コネクタは二次元

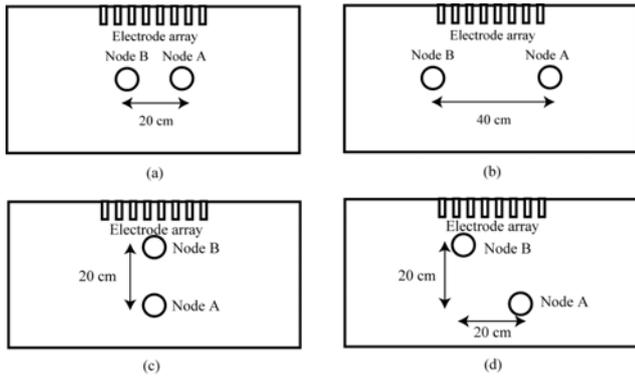


図 5 アンテナの配置  
Fig. 5 Position of antennas

表 1 (a)の場合の各方式での受信電力

Table 1 Received power of each method in the case of (a)

	端末Aの受信電力		端末Bの受信電力		端末A+Bの 受信電力
	dBm	mW	dBm	mW	
Aに集中	12.9	19.5	-3.6	0.4	19.9
Bに集中	-4.9	0.3	11.7	14.8	15.1
時分割方式	10.8	12.0	7.8	6.0	18.1
手動による 位相制御方式	8.7	7.4	10.5	11.2	18.6

表 2 (b)の場合の各方式の受信電力

Table 2 Received powers of each method in the case of (b)

	端末Aの受信電力		端末Bの受信電力		端末A+Bの 受信電力
	dBm	mW	dBm	mW	
Aに集中	14	25.1	-2.5	0.6	25.7
Bに集中	-10.6	0.1	14.3	26.9	27.0
時分割方式	9.5	8.8	12.5	17.7	26.5
手動による 位相制御方式	11.2	13.2	11.8	15.1	28.3

通信シートの端を挟むように取り付けられ、二次元通信シートの一边に 5cm ごとに設置されている。図 4 はパイロット信号を送信するクライアントである。パイロット信号は 10mW で送信している。本実験で用いたアンテナは直径 55mm で、無指向性のものを用いる。二次元通信シートのサイズは 150cm×64cm。電力送信用の周波数は 2.44GHz を用い、シート中央の 8 ポートから 1W ずつ送信する。なお、電極を取り付けている辺以外のシートの端には反射を抑制するための定在波低減機構を取り付けて実験をおこなっている。

今回の実験においては、時分割方式ではクライアントからのパイロット信号から各端末への最適位相を決定している。また位相制御方式では、時分割方式との基礎的な比較検討のために、位相の探索方法に依存しないよう手動で位相を調節し最大の電力を得られる位相の組み合わせを探索している。手動による位相制御は、以下のような手順で行った。まず、図 2 におい

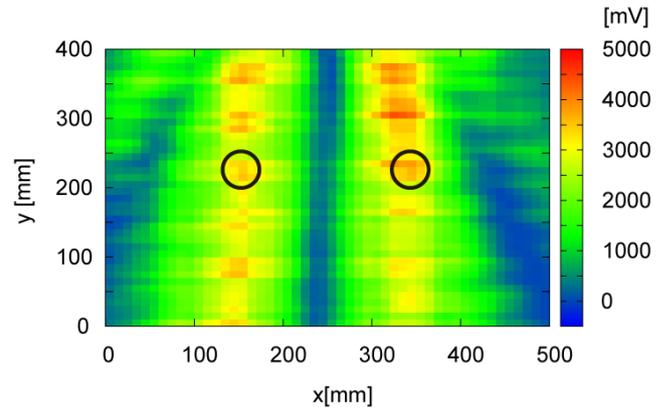


図 6 (a)の場合の二次元通信シート上の電力分布

Fig. 6 Power distribution on the 2D sheet in the case of (a)

て電極 3 の位相を 0 とし、次に電極 6 の位相を 30 度ずつ変化させて最も大きな電力が得られる位相を探索する。つぎに電極 3 および 6 の位相を固定し、電極 2 の位相を 30 度ずつ変化させて最も大きい電力を得られる位相を探索する。以下、同様に電極 7, 1, 8, 4, 5 の順に位相を探索する。また時分割方式、位相制御方式での受信電力の最大と最小のばらつき  $x$  は 2 とした。

## 5.2 実験結果

図 5 に示すような(a)から(d)の 4 つのアンテナの配置に対して実験を行った。まず、電極に対して平行にアンテナを設置し、測定を行った。アンテナの位置は図 5(a)及び(b)に示すように、シートの中央から対称に 20cm と 40cm の間隔で配置した。表 1 および 2 は、時分割方式、及び手動による位相制御方式による各ノードの受信電力を示している。片方の端末に集中した場合、もう片方の端末ではほとんど電力を受信できていない。時分割方式では、大きな電力を得られた方にばらつき最大まで偏って電力を送信する場合に効率が最大となり、ばらつきが小さくなるほど効率が悪くなる。また、時分割方式では最適位相の切り替え時間のオーバーヘッドがあるが、表の受信電力は位相の切り替え時間は考慮していない。この測定結果より、時分割方式よりも位相調節方式の方が効率よく電力を送信できることがわかる。

また、手動による位相調節方式を用いた場合の二次元通信シートの電力分布を図 6 に示す。黒い丸はアンテナの位置を表している。この図より手動で位相を制御した場合に、アンテナが置かれた位置に電力が集中できていることがわかる。

次にシートの中央に電極アレイに対して垂直方向に 20cm 間隔でアンテナを配置した場合について測定を行った(図 5(c))。表 3 はこの場合の各方式での受電電

表 3 (c)の場合の各方式での受信電力

Table 3 Received power of each method in the case of (c)

	端末Aの受信電力		端末Bの受信電力		端末A+Bの 受信電力
	dBm	mW	dBm	mW	mW
Aに集中	16.2	41.7	13.7	23.4	65.1
Bに集中	14.6	28.8	16.1	40.7	69.6
時分割方式	14.6	28.8	16.1	40.7	69.6
手動による 位相制御方式	15.8	38.0	15.4	34.7	72.7

表 4 (d)の場合の各方式での受信電力

Table 4 Received power of each method in the case of (d)

	端末Aの受信電力		端末Bの受信電力		端末A+Bの 受信電力
	dBm	mW	dBm	mW	mW
Aに集中	15	31.6	3.9	2.5	34.1
Bに集中	0.5	1.1	18.8	75.9	77.0
時分割方式	12.5	17.8	15.5	35.6	53.5
手動による 位相制御方式	11.7	14.8	14.2	26.3	41.1

力を示している。水平方向の場合に比べて、どちらに集中した場合でも両方の受電電力が大きい。これはビームの集束方向が同じであるからと考えられる。時分割方式では、端末 B に集中した場合に端末 A との受信電力の差が 2 倍以下であるため、常に端末 B に電力を集中する場合が効率最大となっている。また、垂直方向にアンテナがある場合でも位相制御方式の方が効率よく電力を送信できていることがわかる。

最後に電極アレイに対して斜めにアンテナを配置した場合について測定を行った(図 5(d))。表 4 はこの場合の各方式の受信電力を示している。電極アレイに対して斜めにアンテナ配置した場合は、端末 A と B の受電電力に大きな差が生じていることがわかる。この場合は時分割の方が効率良く電力を送信できる結果となった。しかし、今回の位相制御方式は 30 度ずつの探索と大雑把なものであり、より最適な位相が存在する可能性がある。

位相制御方式は一度位相が決定すると切り替える動作が必要ないため、時分割方式よりも安定して電力を送信することができると考えられる。特に端末の数が増えると、アンテナ 1 つ当たりの最適な位相で電力伝送を行う時間は短くなり、また切り替えの頻度も頻繁になると考えられる。このことから位相制御方式の最適な位相制御をパイロット信号の位相から得ることができれば、時分割よりも安定して電力を送信することが可能である。

## 6. まとめ

本研究では、二次元通信システムのための複数端末への効率的な電力供給のための方式として時分割方式とパイロット信号による位相制御方式を提案した。ま

た、提案した方式について実測評価を行った。今後、パイロット信号による自動位相制御方式の実験を行い、時分割方式との比較検討を行う予定である。さらに端末の数を増やした場合の検討も行う予定である。

## 文 献

- [1] J. Scott, F. Hoffmann, M. Addlesee, G. Mappt, and A. Hopper, "Networked surfaces: A new concept in mobile networking," ACM Mobile Network and Applications, vol.7, no.5, pp.353-364, 2002.
- [2] J. Lifton and J. Paradiso, "Pushpin computing system overview: A platform for distributed, embedded, ubiquitous sensor networks," in Proc. Pervasive Comp., Lecture Notes in Computer Science (LNCS), vol.2414, pp.139-151, 2002.
- [3] K.V. Laerhoven, N. Villar, A. Schmidt, and H.W. Gellersen, "Pin & play: The surface as network medium," IEEE Commun. Mag., vol.41, no.4, pp.90-95, 2003.
- [4] T. Sekitani, M. Takamiya, Y. Noguchi, S. Nakano, Y. Kato, K. Hizu, H. Kawaguchi, T. Sakurai, and T. Someya, "A large-area flexible wireless power transmission sheet using printed plastic MEMS switches and organic field-effect transistors," in Proc. IEEE Int. Electron Devices Meeting (IEDM) Conf., pp. 287-290, 2006.
- [5] K. Minamizawa, Y. Makino, and H. Shinoda, "Two-dimensional signal transmission for networked sensing," in Proc. SICE Annual Conf., pp.3816-3819, 2005.
- [6] T. Matsuda, T. Oota, Y. Kado, B. Zhang, "Performance Evaluation of Efficient Power Transmission System Using Automatic Phase Adjustment of Multiple Inputs for 2D Communication," in IEICE Technical Report on Ubiquitous and Sensor Networks (USN), USN2010-10, pp.29-33, 2010.