

面近接カプラを用いた2次元信号・電力伝送 Two-Dimensional Transmission of Signal and Power Using Surface Proximity Couplers

篠田 裕之[†] 板井 裕人[‡]
Hiroyuki SHINODA[†] and Hiroto ITAI[‡]

[†] 東京大学大学院情報理工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

[†] Graduate School of Information Science and Technology,
The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656 Japan

[‡] 株式会社セルクロス 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

[‡] Cellcross Co. Ltd., 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033 Japan

E-mail: [†] shino@alab.t.u-tokyo.ac.jp, [‡] itai@cellcross.co.jp

Abstract

In this paper, we introduce the latest results of our two-dimensional communication project. The communication elements that touch the surface of a Two-Dimensional Signal Transmission (2DST) sheet establish the connection being supplied with the power by the 2DST sheet. The system allows free location of the element, and proximity (non-contact) connection is realized stably. The structure of 2DST sheet is simple and fabricated with various materials at low cost. Since the elements communicate with electromagnetic waves confined in two-dimensional medium, they are free from the interference from the devices apart from the sheet. In the manuscript, we show the result of 8 W power transmission using a converging beam in the sheet.

1. はじめに

我々のグループでは二次元通信，すなわち薄いシート内（二次元媒体）を伝播する電磁波を用いて通信する技術の研究を進めている[1,2]。通信距離は数m程度までを想定し，媒体上の任意の地点にカプラを近接させることで高効率の信号伝送が可能となるシステムの確立を目指している。本技術の信号伝送における特長の一つは，無線に比べて混信や情報漏洩の問題が少ないことである。また信号帯域を制限された無線に比べ，より広い帯域を利用する高速通信が原理上可能である。もう一つの顕著な特長は，電力をも伝送できることである。シートに手を触れたときの安全性を保證できる範囲内であれば，センサやタグなどへの微弱電力はもちろん，家電などへの電力供給も可能になると考えられる。その場合には電氣的接点がなくショートの大危険もない安全な電力供給が実現されることになる。

このように二次元通信は，接続箇所の2次元的な自由度は確保しつつ電磁波を空間に放射しないことによって，高速性，秘匿性を有する通信と電力のワイヤレス伝送を実現する。現在よりも一桁多い情報

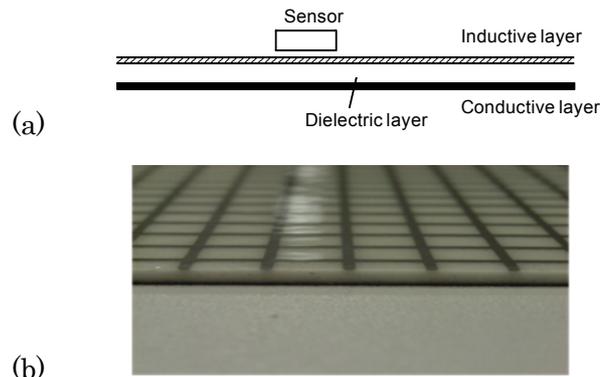


Fig. 1: 二次元通信シートの断面図 (a) と写真(b).

機器・素子が身のまわりで動作し互いに高速通信するために必須となる技術領域と考えられる。

本報告では特に通信シート上に収束ビームを生成し，シート上の機器に高効率で電力伝送を行う実証実験の結果を述べる。8 Wの電力を伝送し，小型の映像表示機器を動作させることができた。なお以下の実験の内容は文献 [3] において報告されているも

のである。

$$Z \equiv R + jX \equiv \frac{E_x}{I_x} \quad [\square \Omega] \quad (1)$$

2. 二次元媒体の構造[1]

三次元通信としての無線と比較したときの二次元通信の難点は、表面に特殊な通信層を必要とすることである。しかし二次元通信層は Fig. 1 のような簡単なものであり様々な低コスト素材で実現することができる。特に電氣的接触を前提としていないため、導電層として例えば数 μm のアルミ層を用いることができる。このような構造を机の表面にあらかじめ組みこんだ場合、通信層を備えることによる材料コストの増分はごくわずかである。また導電性の糸を編んだファブリックを通信層に用いれば、伸縮可能な柔軟素材にセンサを分布して動作させることもできる。このような構造の通信シートと結合するカプラの基本原理を以下で述べる。

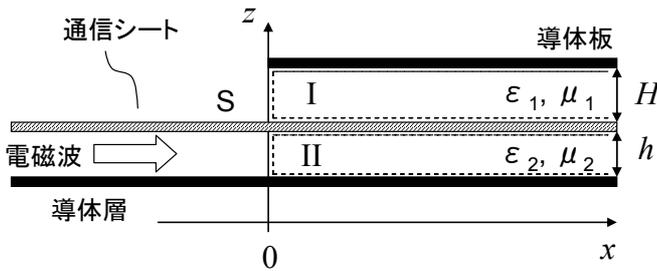


Fig. 2 通信シートとカプラのモデル

3. 平板型カプラの構造と基本原理[3]

Fig. 2 のように、電磁波が通信シート内を $+x$ 方向に伝播しているところに誘電体 I および導体板が近接した場合、どのような電磁場が生成されるかを考える。通信シートの厚みを h とし、通信シート上 $x > 0$ において、厚み H の誘電体（誘電率 ϵ_1 、透磁率 μ_1 ）および導体板が配置されている（これがカプラとなる）。通信シート内部

$(0 < z < h)$ の誘電率を ϵ_2 、透磁率を μ_2 とする。通信シートの導電層とカプラの導体板は損失の無い完全導体、メッシュ状導電層 S は有限なインピーダンス（インダクタンス）を持つ層とする。メッシュ状導電層は十分に薄く、 x 、 y 方向について等方性を持つものと仮定する。通信シートのメッシュ状導電層のシートインピーダンス Z は式 (1) のように定義される。

ここで $E_x[\text{V/m}]$ はメッシュ状導電層における x 方向電界（のメッシュ 1 周期における平均値）、 $I_x[\text{A/m}]$ は同じ場所での電流密度の x 成分（のメッシュ 1 周期における平均値）であり、 y 軸に沿った単位長さを横切る電荷量とする。上記前提のもと、紙面に垂直な方向に一樣な 2 次元問題を仮定し、マクスウェル方程式の解を求めると、 $+x$ 方向に進行する波動は 2 つの独立なモードを含むことがわかる。ここで、 $A \equiv (\mu_2 \epsilon_2 - \mu_1 \epsilon_1) \omega^2$ 、カプラ内および通信シート内電界の z 成分をそれぞれ E_z^I および E_z^{II} 、カプラ内および通信シート内磁束密度の y 成分をそれぞれ B_z^I および B_z^{II} とし、定数を C とした。また、時間項 $\exp(j\omega t)$ は省略した。

本構造における電磁解は、以下の 2 つの極端な場合

$$(i) \left| j\omega X \left(\frac{\epsilon_1}{H} + \frac{\epsilon_2}{h} \right) \right| \gg |A|, \quad (ii) \left| j\omega X \left(\frac{\epsilon_1}{H} + \frac{\epsilon_2}{h} \right) \right| \ll |A|$$

に表記が簡単になる。これら 2 つの場合のうち、有意に通信シート内の電磁波をカプラに吸い出せる条件は (i) のときのみであることがわかっている（詳細は省略）。そこで以下では、(i) についての解のみを示す。

$$\text{条件: } \left| j\omega X \left(\frac{\epsilon_1}{H} + \frac{\epsilon_2}{h} \right) \right| \gg |A| \text{ のとき}$$

モード a

$$\begin{pmatrix} E_z^I \\ B_y^I \\ E_z^{II} \\ B_y^{II} \end{pmatrix} \approx C \begin{pmatrix} \frac{1}{\epsilon_1} \\ -\frac{\mu_1 \omega}{k_a} \\ \frac{1}{\epsilon_2} \\ -\frac{\mu_2 \omega}{k_a} \end{pmatrix} \exp(-jk_a x) \quad (2)$$

ただし

$$k_a^2 = \frac{1}{\epsilon_1/H + \epsilon_2/h} \left(\frac{\epsilon_1}{H} \mu_2 \epsilon_2 + \frac{\epsilon_2}{h} \mu_1 \epsilon_1 \right) \omega^2 \quad (3)$$

モード b

$$\begin{pmatrix} E_z^I \\ B_y^I \\ E_z^{II} \\ B_y^{II} \end{pmatrix} \approx C \begin{pmatrix} -\frac{1}{H} \\ \frac{\varepsilon_1 \mu_1 \omega}{k_b} \frac{1}{H} \\ \frac{1}{h} \\ -\frac{\varepsilon_2 \mu_2 \omega}{k_b} \frac{1}{h} \end{pmatrix} \exp(-jk_b x) \quad (4)$$

ただし

$$k_b^2 \approx \omega X \left(\frac{\varepsilon_1}{H} + \frac{\varepsilon_2}{h} \right) + \mu_1 \varepsilon_1 \omega^2 \quad (5)$$

なお上記解の導出では、各空間 I および II 内それぞれにおいて高さ z による電磁界変化が緩やかであるための条件

$$\sqrt{\omega X \left(\frac{\varepsilon_1}{H} + \frac{\varepsilon_2}{h} \right)} H \ll 1 \quad \text{かつ} \quad \sqrt{\omega X \left(\frac{\varepsilon_1}{H} + \frac{\varepsilon_2}{h} \right)} h \ll 1$$

を仮定している。

モード a の波数 k_a とモード b の波数 k_b が異なるため、それらが同時に存在して干渉すると x 方向に沿って

$$L = \frac{2\pi}{|k_a - k_b|} \quad (6)$$

なる周期で電磁エネルギー密度が変化する。すなわち電磁波は通信シート内部 ($0 < z < h$) と外部 ($h < z < h + H$) を周期 L で出入りしながら進行することがわかる。特に $x < 0$ において、通信シート内のみにエネルギーが局在しており、 $x = 0$ において

$$\begin{pmatrix} E_z^I \\ E_z^{II} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ p \end{pmatrix} \quad (7)$$

なる境界条件を仮定すると、 $x > 0$ における垂直方向電解は

$$\begin{pmatrix} E_z^I \\ E_z^{II} \end{pmatrix} = p \left[\begin{pmatrix} 1 \\ \frac{\varepsilon_1 / \varepsilon_2 + H/h}{1} \end{pmatrix} \exp(jk_a x) + \begin{pmatrix} -1 \\ \frac{\varepsilon_1 / \varepsilon_2 + H/h}{1} \end{pmatrix} \exp(jk_b x) \right] \quad (8)$$

で与えられる。 $x > 0$ において通信シート内（領域 II 内）電界が消失してしまう地点が存在するための条件は、

$$\left| \frac{1}{1 + \varepsilon_2 H / (\varepsilon_1 h)} \right| = \left| \frac{1}{1 + \varepsilon_1 h / (\varepsilon_2 H)} \right|$$

すなわち

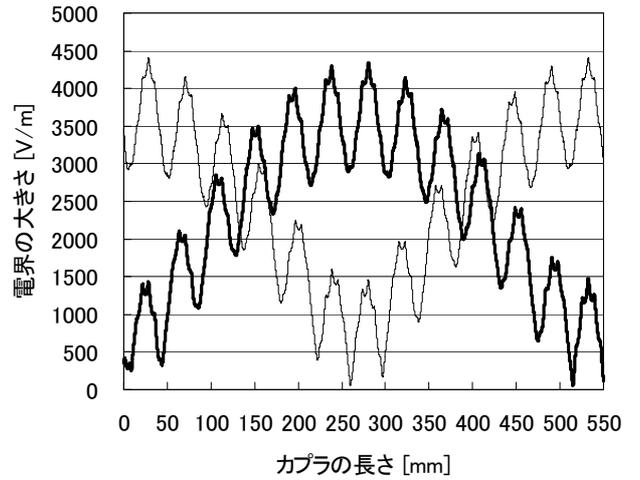


Fig. 3 シミュレーション結果

$$\frac{H}{\varepsilon_1} = \frac{h}{\varepsilon_2} \quad (9)$$

で与えられる。 $k_a \approx k_b$ の場合、電界が消失することは、その地点における電磁エネルギーが消失すること、すなわちその地点ではかつて通信シート内に局在していた電磁エネルギーが通信シート上に全て吸いあがっていることを意味する。その場所でカプラ内の電磁波を吸収することができれば通信シート内の電力を全て吸収できることになる。

4. シミュレーション

数値シミュレーションによって、通信シート内の電磁波がカプラに吸い上げられることを確認する。Fig. 2 のモデルにおいて、通信シートの誘電層とカプラの誘電体は、条件 (i) および式 (9) を満たすよう厚さを共に 2 mm、比誘電率を共に 1.5 とする。また、各導電層および導電体は厚さが $10 \mu\text{m}$ の導体とし、メッシュ状導電層は、メッシュ周期が 7 mm、その線幅を 1 mm とする。Fig. 2 のように、通信シートの端部から電磁波を導入し、右端をエネルギー吸収境界としたときの電磁波の挙動が Fig. 3 に示されている。通信シート内 $z = h/2$ での電界強度およびカプラ内 $z = h + H/2$ における電界強度を $+x$ 方向に沿って表示している。この結果から、カプラの長さを 280 mm とし、端部において電磁波を吸収すると理論上 96% 以上の割合で通信シートから電磁波を吸い出すことができることがわかる。

次の章では、カプラの端部に接続された全波倍整

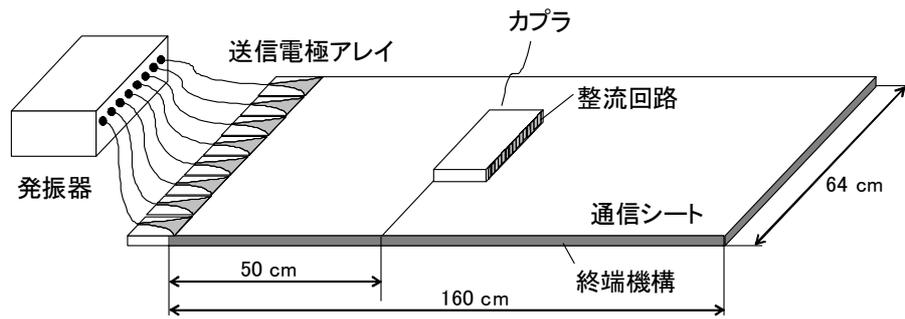


Fig. 4 実験システム

流回路によって電磁波を直流に変換し、どの程度の電力が得られるかを実験により確認する。

5. 実験

Fig. 4 に実験システムを示す。位相可変な 2.4GHz、5 W 出力の発振器を 8 個接続し、位相を調整して収束ビームを生成する。カプラの構造は Fig. 5 に示されている。長さ 10 cm、幅 20 cm の構造体端面に、15 個の全波倍整流回路を配置した。これらの出力端子はすべて並列接続し、抵抗負荷と接続した。送信電極アレイとカプラの距離は 50 cm とし、発振器の位相の調節を行ってカプラに電力が集束するように設定した。Table 1 に実験結果を示す。ここで、負荷 R [Ω] の両端に発生する電圧 V_{pp} [V] を計測し、これと負荷抵抗の値から電力 $P = V_{pp}^2 / R$ [W] を求めた。この結果から、合計 40W の入力に対し、8W 程度の直流電力を取り出せることが確認できた。

Table 1 実験結果

負荷 R [Ω]	電圧振幅 V_{pp} [V]	電力 P [W]
10	9.0	8.10
12	10.0	8.33
15	11.0	8.07
22	13.0	7.68

6. おわりに

二次元通信というユビキタス通信の新しい物理層を紹介した。二次元通信は、接続場所の 2 次元的な自由度は確保しつつ電磁波を空間に放射しないことにより、高速性、秘匿性を有する通信と電力のワイヤレス伝送を実現する技術である。机や壁の表面は電磁波を閉じ込める構造をもつ必要があるが、それらは低コストの素材で実現することができる。本論文では特に二次元通信を用いた電力伝送について検討を行った。通信シートから電力を取得するためのカプラの提案を行い、実験により 8W の直流電力を取得できることが確認できた。

文献

- [1] 篠田裕之, “素材表面に形成する高速センサネットワーク,” 計測と制御, Vol. 46, No. 2, pp. 98-103, 2007.
- [2] H. Shinoda, Y. Makino, N. Yamahira, and H. Itai, “Surface Sensor Network Using Inductive Signal Transmission Layer,” Proc. INSS07, pp. 201-206, 2007.
- [3] 板井裕人, 箱崎光弘, 張兵, 篠田裕之, “シート状媒体を用いたワイヤレス電力伝送の一手法,” 電子情報通信学会 2008 年ソサイアティ大会論文集, 2008 年 9 月出版予定.

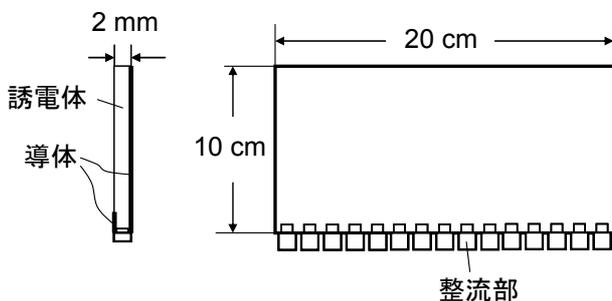


Fig. 5 カプラの構造