

ウェアラブルデバイスにおける 電界結合型ワイヤレス電力伝送技術の検討

製品・機能評価課 室 慧悟、奈須野雅明

1. 緒言

近年、様々なウェアラブルデバイスが開発されている。現在のウェアラブルデバイスは小型の内蔵電池により動作するため、頻繁に充電を行う必要があり、使用者の負担となっている。電源管理の負担を低減するため、ワイヤレス電力伝送(WPT)技術の適用が望まれている¹⁾。近距離での WPT 技術としては磁界結合型と電界結合型が挙げられる。電界結合型では磁界結合型と比べ、周囲の導体への誘導加熱の恐れがない等の利点がある一方で伝送距離が比較的短いという欠点があった。近年、ヘリカル共振器を利用した WPT 技術が提案され、電界結合型においても長距離への電力伝送の可能性が示された²⁾。

本研究では電界結合型 WPT 技術のウェアラブルデバイスへの適用について調査した。

2. 実験方法

2.1 伝送部作製

エナメル線を用いてループコイル、ヘリカルコイルを作製し、アルミニウム材の電極に接続することで伝送部を作製した。伝送部の概略図を Fig. 1 に示す。伝送部における各部品の値を Table 1 に示す。

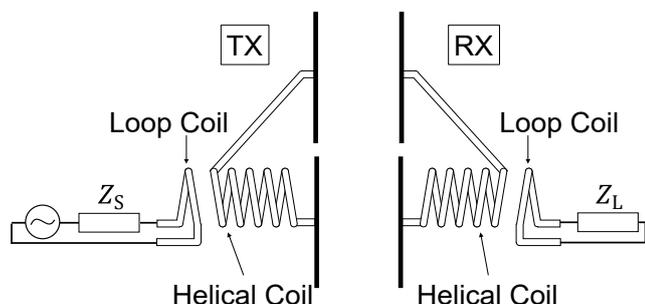


Fig. 1 Schematic representation of capacitive WPT system

Table 1 Components of WPT system

Wire diameter	0.6mm
Coil diameter	82mm
Electrode	150mm×100mm×1mm
Distance Between Electrodes	30mm
Wire length (Loop Coil)	360mm
Wire length (Helical Coil)	1,850mm

2.2 伝送部評価

2.2.1 伝送効率

伝送部は Fig. 2 のように二端子対回路とみなすことができる。そして伝送効率(η)を Eq. (1) のように有効電力比で定義する。 P_{in} 、 P_L はそれぞれ負荷を含んだ伝送部、負荷のみの有効電力である。

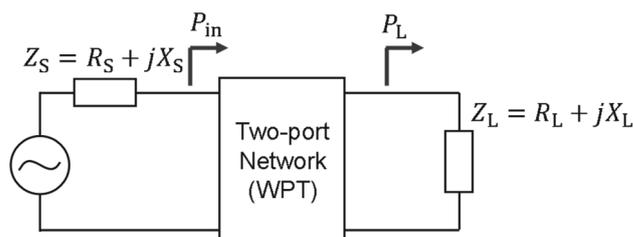


Fig. 2 Circuit diagram of WPT

$$\eta = \frac{P_L}{P_{in}} \quad (1)$$

2.2.2 最適化条件

伝送効率について最適化を行うために Roberts の「共役映像インピーダンス」理論を用いる³⁾。まず、Fig. 2 についてポート 1 を送電側、ポート 2 を受電側として究極利得 (Ultimate Gain) を適用すると Eq. (2) となる。 P_S は電源におけるインピーダンスに対する有効電力である。

$$G_{21} = \frac{P_L}{P_S} \quad (2)$$

この究極利得となる条件は同時に共役整合となることである (Fig. 3)。

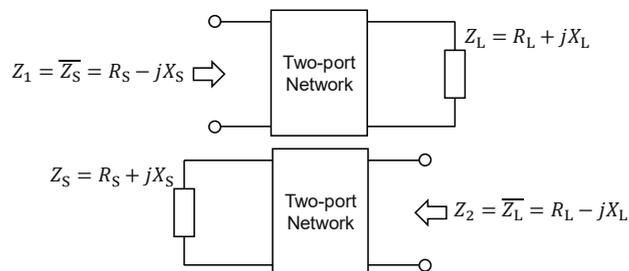


Fig. 3 Conjugate image impedance matching

このとき、 $P_S = P_{in}$ が成り立つため、最適時の伝送効率(η_{opt})は究極利得に等しい。したがって、二端子対回路のパラメータが判明しているとき、最適な電源および負荷のインピーダンスを算出できる。Roberts の理論では Z パラメータを用いている。Z パラメータの各値について

$Z_{mn}=R_{mn}+jX_{mn}(m, n=1, 2)$ とおく。

$$\theta_R = \sqrt{\left(1 - \frac{R_c^2}{R_{11}R_{22}}\right) \left(1 - \frac{X_c^2}{R_{11}R_{22}}\right)} \quad (3)$$

$$\theta_X = \frac{R_c X_c}{R_{11}R_{22}} \quad (4)$$

$$R_c + jX_c = \sqrt{Z_{12}Z_{21}} \quad (5)$$

Eq. (3)-(5)を用いて最適時の Z_S 、 Z_L 、 η_{opt} を表す。

$$Z_S = R_{11}(\theta_R + j\theta_X) - jX_{11} \quad (6)$$

$$Z_L = R_{22}(\theta_R + j\theta_X) - jX_{22} \quad (7)$$

$$\eta_{opt} = G_{21} = \left| \frac{Z_{21}(1 - \theta_R + j\theta_X)}{Z_{12}(1 + \theta_R + j\theta_X)} \right| \quad (8)$$

2.2.3 測定方法

伝送部の測定にはベクトルネットワークアナライザ (Agilent Tech., E5071C)を用いた。測定範囲は10M~40MHzで伝送距離(d)を20~100mmと変化させ、Sパラメータを取得した(Fig. 4)。得られたSパラメータをZパラメータに変換して各値を算出した。

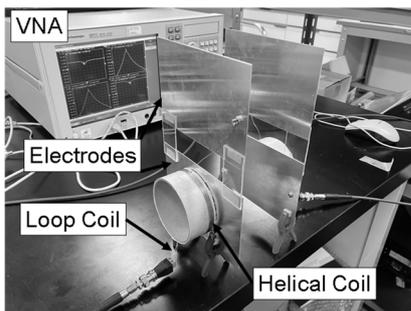


Fig. 4 Experimental setup

3. 実験結果および考察

最適時の伝送効率(η_{opt})を算出し、測定範囲内で最大となる伝送効率を η_{max} とし、そのときの周波数を f_{max} とおく。

Fig. 5 に伝送距離に対する η_{max} および f_{max} の変化を示す。

伝送距離 20mm のとき、最大となる伝送効率は 85%であり、電源および負荷の最適インピーダンスはそれぞれ、 $Z_L=24.4-33.2j\Omega$ 、 $Z_S=28.2-27.7j\Omega$ と求められた。伝送距離に対して η_{max} は減少しているが、 f_{max} は伝送距離が 60mm 以降、21.7MHz 付近の値となっている。これは送受信部の電極間における相互キャパシタンスの値が小さくかつその変化が緩やかになったためと考えられる。

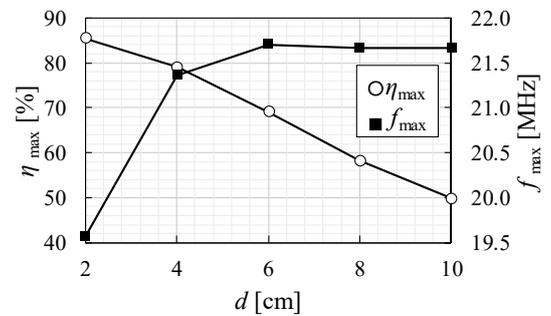


Fig. 5 Maximum efficiency and frequency vs. distance

4. 結言

ループコイル、ヘリカルコイル、電極からなる電界結合型ワイヤレス電力伝送の伝送部を作製した。伝送部の評価はネットワークアナライザを用いて実施した。得られたデータをRobertsの理論を用いることでその伝送部に対する電源および負荷の最適なインピーダンスを算出することができた。本研究で作製した伝送部は伝送距離 20mm のとき 85%の伝送効率が期待できる。

参考文献

- 1)宮村騎久也, 宮路祐一, 大村 廉: 研究報告高齢社会デザイン, **9**(2017) no. 13, pp. 1-6
- 2)大矢根蒼, 山本真義: 電子情報通信学会和文論文誌 B, **104**(2021) pp. 309-311
- 3)S. Roberts: Proc. IRE, **34**(1946) pp. 198-204

キーワード: ワイヤレス、電界結合、ウェアラブル

Examination of Capacitive Power Transfer Applying to Wearable Devices

Product and Function Evaluating Section; Keigo MURO, Masaaki NASUNO

Power supply management is a bottleneck for wearable device users. Wireless Power Transfer (WPT) has emerged as a promising technology to this problem lately. The conjugate image theory is applied to determine this optimal network as a function of the characteristics of the capacitive WPT system. The prototype WPT circuit is expected to achieve >85% efficiency at the transition distance of 2cm.