

超音波の干渉効果による遠距離音場特性の評価

石山 俊彦* 城戸 透**

Characteristics of Sound Pressure Field Influenced by Ultrasonic Interference

Toshihiko ISHIYAMA Tohru KIDO

Abstract — This paper describes influence of ultrasonic interference on the sound pressure field by using two ultrasonic transducers. Two ultrasonic transducers oscillated in the same amplitude and the phase, and increased the output voltage by superposition of ultrasonic waves. Ultrasonic interference also increased the output voltage of the sensor, which was set on the offset position.

Key words : Ultrasound, Interference, Sound pressure, Transducer, Sensor, Ubiquitous

1. はじめに

電子情報端末に無線機能が標準装備され、回路の低消費電力化の進展や大容量二次電池の搭載により、電子機器のモバイル化が進んでいる。電子機器が生活のあらゆるシーンでネットワークにつながることで、電子機器の使用が場所に束縛されない「ユビキタス環境」の利便性が享受されるようになってきた。残された課題である電力源のユビキタス化についても、研究開発の対象となりつつある[1],[2]。

電力源のユビキタス化の方法として、回路の低消費電力化や大容量バッテリーの搭載が既に行われている。検討中の項目として自立型の発電機構の搭載や外部からのワイヤレスによる電力供給があげられる[1],[3]。ワイヤレスによる電力伝送は、マイクロ波、電磁結合、レーザー、超音波を伝送手段として、電力を遠隔的に伝送する技術である[4]-[8]。ワイヤレス電力伝送は、当初、宇宙空間で発電した電力を地球に伝送する「宇宙太陽光発電衛星 (Solar Power Satellite : SPS) として提案された[6]。近年では、「ユビキタス電源[2]」などとして、ユビキタスコンピューティング向けの電力技術としても検討されている。

文献[4]-[8]に示された方法では、電波や音波が到達する範囲に設置された電子機器には電力が供給される。このことは、M. Weiserが理想とした、コンピュータがあらゆる場所に遍在、相互に接続することで人々の生活に利便性を与えることができるユビキタス社会[9]において提供されるべきサービス、いわゆる「いつでも、どこでも、誰でも」型のサービスとして好都合な伝送方式である。

一方、企業や大学等でユビキタスコンピューティングの商用サービス化を考えた場合、「いつでも、どこでも、誰でも」型のサービスに加え、パーソナライズ性の向上やサービスの差別化を想定した「今だけ、ここだけ、あなただけ」型のサービスの展開も求められている[10]。特に、サービスの個別化やそれにとまなう課金を念頭に置くと、「今だけ」型サービスのためのインフラを拡充することは将来のユビキタスサービスの実現に重要な意味を持つ。

本稿では、ワイヤレス電力伝送を「今だけ、ここだけ、あなただけ」型サービスに適応させるため、電力の伝送に選択性を持たせる方法を検討した。超音波の干渉効果を用い、遠距離での音場特性をシミュレーションと実験により評価、伝送の選択性を検討した。

* 釧路高専 情報工学科

** 愛媛大学 教育学生支援部

2. ユビキタス社会における「今だけ、ここだけ、あなただけ」型サービスとユビキタス電源

情報通信基盤の構築とともに、コンピュータはネットワークを介すことで「いつでも、どこでも、誰とでも」、情報をやり取りすることができるようになった。コンピュータの遍在化するユビキタス社会において、「いつでも、どこでも、誰とでも」つながることはインフラストラクチャーとしては重要ではあるが、個別のユーザにとって、パーソナライズされていないサービスが提供されても、わざわざ使う価値があるか疑問が残る。サービス提供者にとっても、インフラストラクチャーとしてサービスを提供することは重要であるが、利用者の囲い込みや課金など、競合者との差別化が難しいのであれば、ビジネス上の旨味は少ない。

文献[10]-[12]で述べられたように、「いつでも、どこでも、誰でも」型のサービスに、センサやアクチュエータ技術を付け加えることで、実空間と仮想空間が接続される。コンピュータからユーザの時間や空間(実空間)が把握できることで、「今だけ、ここだけ、あなただけ」が識別できるようになり、パーソナライズ性の高い状況依存型サービスが提供できるようになる。さらに、場所・時間などのコンテキスト情報の組み合わせやユーザ自身のカスタマイズにより、さらに大きなサービス価値が生まれる可能性がある。ただし、「いつでも」型サービスと「今だけ」型サービスは対立するものではなく、ユーザのニーズを踏まえた上で、提示される並存すべきサービスであることに注意すべきである。

「今だけ」型サービスを支えるためのインフラに要求される条件として、課金サービスを例として考える。課金サービスでは、受益者のみにサービスが行き届くことが望ましい。ワイヤレス電力供給において、電磁波やレーザーなどの伝送媒体を用いて、「誰にでも」届くようにすることは、誰でもサービスを享受することができる反面、サービスの受益者を特定して課金することは難しくなる。あらかじめ、認証などによりサービス享受者を特定してから、電力を送送することも考えられる。その場合でも、サービス享受対象者の隣に、勝手に受電装置をおかれた場合、容易に盗電される可能性がある。また、送電装置と受電装置の間に生体が位置した場合、伝送手段が生体に照射され、健康上の影響を及ぼすことも考えられる。

そのため、「今だけ」型サービスを支えるワイヤレス電力伝送技術として伝送方法に選択性を持たせ、「私だけに」電力を送送する工夫が必要となる。ワイヤレ

ス電力伝送技術に選択性を持たせる方法として、前述の認証を用いることが考えられる。伝送手段が超音波であれば、音波の干渉性や回折効果を使うことにより電力伝送を行うことができる。干渉性を利用することで、受電装置が置かれている場所にピンポイントで電力を送ることが考えられる。受電装置が置かれている場所以外では干渉により超音波の音圧は低くすることができるので、盗電を目的に受電装置を設置されても、正規の利用者のみに電力を送ることができる。

3. 実験方法

超音波の遠距離での音場特性を実験により評価、シミュレーション結果と比較した。超音波を伝送手段として、音波の持つ干渉性を利用、伝送される超音波に場所による選択性を持たせることができる。以下、実験方法およびシミュレーション方法について述べる。

3.1 実験方法

2個の超音波トランスデューサ(振動子)を平面上に配置した(図1)。2個の超音波トランスデューサは平面に対して水平に設置、トランスデューサ間の距離はセンサ外装ケースが密着した状態とした。2つのトランスデューサの接したところから中心軸をのばす。トランスデューサの半径 r を基準に、中心軸から離れた位置に設置(オフセット)された受信超音波センサの出力電圧を測定した。オフセットは、中心軸と受信センサ中心間の距離とした。2個の超音波センサの位相および発信音圧を同一とした上で、実験を行った。

個々の超音波トランスデューサは、発振音圧や位相に個体差を持っている。そのため、同じ電圧を印加しても、2つの超音波振動子が同振幅、同位相で振動しているとは限らない。本検討では、実験に用いた2つの超音波トランスデューサ、それぞれに印加電圧や位相を変えて、10 cm離れた受電センサから同じ出力電圧を得られるように調整したのち、実験を行った。



図1. 実験に用いた超音波トランスデューサおよびセンサの配置

送電部はパルスジェネレーター-超音波トランスデューサから構成された。パルスジェネレータでは、交流電圧パルスが発生させ、超音波トランスデューサに印加した。パルスジェネレータとして2チャンネル出力で位相を変えられるNF回路WF1944Bを使用した。超音波トランスデューサに正確に電圧を印加するため、パルスジェネレーター-超音波トランスデューサの間で、アンプによる増幅はしていない。

受電部は超音波センサー-整流・蓄積回路-負荷から構成され、受信した超音波を直流電力に変換し、負荷に供給する。超音波トランスデューサの出力端に倍電圧整流回路を接続した。整流回路を構成するダイオードは $V_f = 0.2 \text{ V}$ のものを使用し、回路の低損失化に努めた。

発振および受信に用いた超音波トランスデューサ、センサは開放型で発振周波数40 kHzのものを使用した。各トランスデューサには印加電圧として、 10 V_{pp} を印加した。

3.2 シミュレーション方法

長谷川の理論にもとづき[13]、2つの円形振動子の速度ポテンシャルが作る音場を、平面状の各地点において計算した。

2個の円形平面状の超音波振動子を平面上におく。振動子の中心間の距離を q とする。2個の振動子は、同振幅、同位相で振動しているものとする。振動子 i が点 $P(r, \theta, z)$ に作る速度ポテンシャルを、 ϕ_i とする。点 P での速度ポテンシャル ϕ は2つの速度ポテンシャルの重ね合わせとして、

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (1)$$

で表される(図2)[14]。

(1)式の右辺の ϕ_i は、振動子から測定地点までの距離に対する速度ポテンシャルとして計算できる。 ϕ_i をもとに、速度ポテンシャルの計算式を示す。

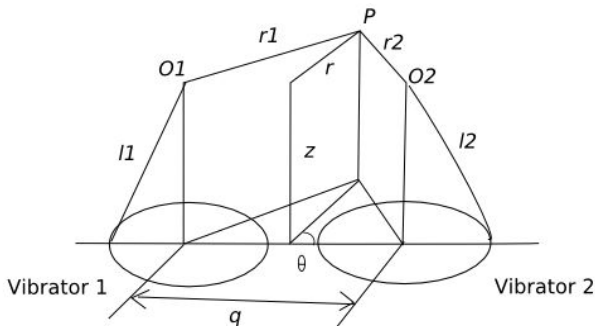


図2. 2つの振動子による速度ポテンシャルの重ね合わせ(文献[14]より作図)

$$\phi_1 = \frac{iV_0}{k} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1) \times j_n(kr_1) P_n(\cos \frac{\pi}{2}) f_n \quad (2)$$

$$f_n = \int_{kz}^{kl} u h_n^{(2)}(u) P_n\left(\frac{kz}{u}\right) du \quad (3)$$

i : 虚数単位、 V_0 : 振動子の速度振幅、 k : 波数、 j_n : 第1種球ベッセル関数、 P_n : ルジャンドル関数、 r_1 : q から P までの距離、 f_n : 回析積分、 $h_n^{(2)}$: 第2種球ハンケル関数

ここで、(3)式は漸化式 $f_n + f_{n-2}$ により、計算することができる[15]。

4. 結果と考察

図3に、超音波トランスデューサの数を変えたときの中心軸上での出力電圧を示す。いずれのトランスデューサからも同じ出力電圧が得られるように、位相と印加電圧を調整した。2個の振動子が同じ発振振幅、位相で発振したので、遠距離での音場特性は2個の振動子の置かれた平面の中心軸上では、出力電圧(音圧)は重ね合わせにより増加した。大きなエネルギーを伝送するためには、超音波トランスデューサの数を増加させることは、受電デバイスが中心軸上であれば有効である。しかし、単純に超音波トランスデューサを増加することは、超音波の届く範囲にエネルギーを撒き散らすことにつながる。この方法は、第2章で述べた「いつでも」型のサービスには適しているが、「今だけ」型のサービスには適さない。

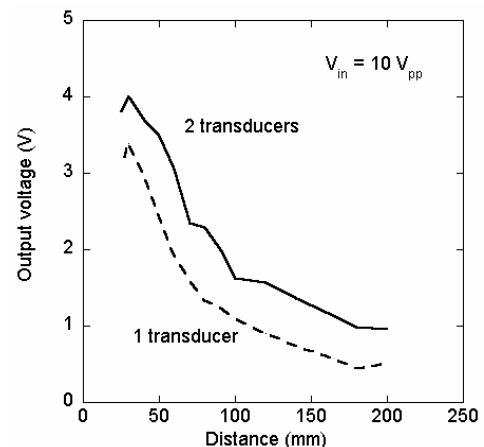
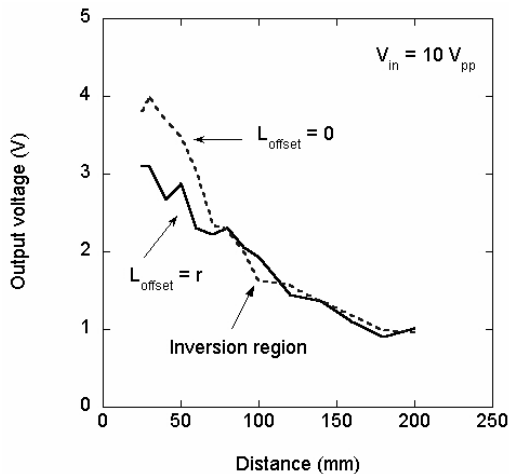


図3. 超音波トランスデューサ数と出力電圧特性

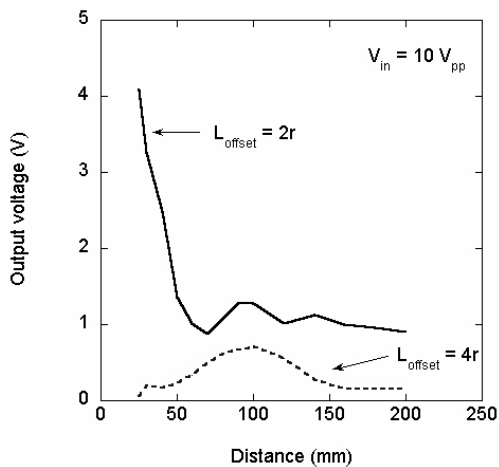
図4に、2つの超音波トランスデューサによる遠距離地点での出力電圧を示す。受信センサが中心軸からオフセットされたときの出力電圧特性を測定した。オフセットの値として、0(中心軸上)、 $r(=8\text{ mm})$ 、 $2r$ 、 $4r$ とした。

実験結果より、 $L_{\text{offset}} = 0$ と $L_{\text{offset}} = r$ を比較すると、例えば、距離 100 mm の地点では $V_{\text{out}}(r) = 1.9\text{ V}$ 、 $V_{\text{out}}(0) = 1.6\text{ V}$ であり、 $V_{\text{out}}(r)$ と $V_{\text{out}}(0)$ の値が逆転した。センサの位置がオフセットされることで、2つのトランスデューサと受信センサ間の距離に差ができた結果、音圧が干渉し、出力電圧値の増加や減少を引き起こす領域ができた(図4(a))。

オフセットが大きくなると、出力電圧は低下した。受信センサの直径分($L_{\text{offset}} = 2r$)だけオフセットされると、中心軸上で距離 70 mm 離れた状態では、出力電圧は 1 V 未満になっている。



(a) Loffset = 0, r



(b) Loffset = 2r, 4r

図4. 受信センサが中心軸からオフセットされたときの出力電圧特性

超音波センサは発振方向の指向性が高く、中心軸から外れると伝送される音圧は低下する。負荷である電子機器の駆動という観点から考えると、受信側で出力電圧が 1 V を下まわれれば、昇圧しても電子機器の駆動は難しくなる。そのため、受信側で出力電圧が 1 V を下まわれれば、電力が供給されていないものとみなすことができる。したがって、中心軸から $2r$ 程度のオフセットがかかることで、電力は供給されないものとみなすことができる。

一方、 $L_{\text{offset}} = 2r$ の場合でも、距離が 100 mm 離れた状態では 1.3 V 程度の出力があることから、昇圧して駆動電力に利用することができる。こうした領域を利用することによって、空間上の多くの領域では殆ど電力が得られないのに、ある狭い領域のみに設置された受信デバイスだけが電力供給されるということが出来る。さらに、この位置は発振トランスデューサ間に位相差や印加電圧差(発振振幅の差)をつけることで変更することができる。トランスデューサの向きなどを変更しなくとも、受信センサの位置が既知であれば、電力を送ることができる。

特に、 $L_{\text{offset}} = r$ と $L_{\text{offset}} = 4r$ を例にとると、受信センサの位置にオフセットを利用することで、出力電圧を急減させることができる。正規の受信センサ(サービス利用者)の近くに、不正利用を目的に偽の受信センサを置いても、偽の受信センサからは殆ど出力電圧が得られない。この現象を利用すると、受電デバイスの位置をもとに、振幅や位相を調整、音圧分布を変化させることで、すぐ近くに設置された受信センサを区別して、正規の受信センサ以外には電力を供給しないようにすることができる。

ワイヤレス伝送の手段として超音波を用いた場合には、Cricket Compass で示されたように対象物の位置情報を高精度に得ることができる[16]。したがって、対象物の位置情報を利用することによって、対象物に電力を送ることが可能になる。以上のように、超音波を用いたワイヤレス伝送を用いた場合、選択的に電力を供給し、「今だけ」型サービスに適應できる可能性がある。

図5に、平面方向($\theta = 0$)での遠距離音場のシミュレーション結果を示す[14]。距離の増大とともに伝送される音圧が減少するなど、実験結果と一致している。また、音圧が $0.2 \sim 0.4$ (相対値)の場合、発振源から離れた地点で、音圧が増加している領域が生まれることが示されている。このようなシミュレーション結果から、水平方向に離れた受電デバイスに電力を送り、かつ、近傍の受信センサには低い音圧しか伝送されず、

結果としてある地点にのみ選択的に電力を送り得ることが示された。

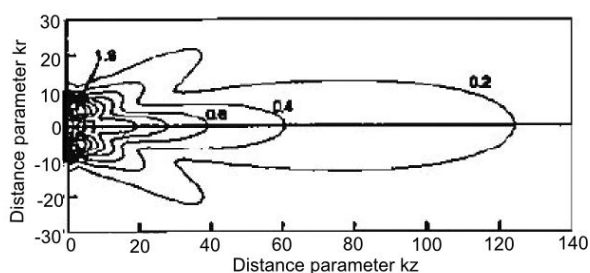


図5. 遠距離音場のシミュレーション[14]

5. まとめ

超音波振動子が2個の場合について、音波の干渉による遠距離での音場特性を、実験およびシミュレーションにより評価した。2個の振動子が同じ振幅、位相で発振している場合、遠距離での音場特性は2個の振動子の置かれた平面の中心軸上では、出力電圧(音圧)は重ね合わせにより増加する。また、干渉により中心軸から離れた場所においても、相応の大きさを持った音波が伝送される。実験では、伝送される音圧を負荷回路で出力される電圧として評価した。シミュレーションによる音場特性から、実験結果を確認した。

以上の結果により、ユビキタス商用サービスにおいて、超音波を用いたワイヤレス伝送を用いた場合、干渉性を利用することで選択的に電力を供給し、「今だけ、ここだけ、私だけ」型サービスに適用し得る電力供給技術を可能とする見通しを得た。

参考文献

- [1] 日経エレクトロニクス: No. 2007.3.26, pp. 95-113, 2007.
- [2] 篠原真毅他: 信学技報, SPS2003-18 (2004) pp. 47-53.
- [3] 日経エレクトロニクス, No. 2003.6.9, pp. 103-133, 2003.
- [4] M. Takamiya et al.: ISSCC' 07, 2007, Paper#20. 4.
- [5] 神, 徳寺: OHM, Vol. 95, No. 9 (2008) pp. 2-3.
- [6] 松本, 篠原: 信学技報, SAT95-77 (1995) pp. 31-36.
- [7] 新野, 嵐: 日本機械学会誌, Vol. 100, No. 944 (1997) p. 800.
- [8] T. Ishiyama et al., Proc. IEEE Ultrasonics Symp., 2003, pp. 1368-1369.
- [9] M. Weiser: Scientific American, Vol. 265, No.

3, (1991) pp. 66-75.

[10] 森川: 人工知能学会誌, 19 (2004) pp. 447-453.

[11] 森川, 南: 電子情報通信学会誌, J88-B (2005) pp. 2137-2146.

[12] <http://www.adnet.ne.jp/nikkei/ijfw/08.html>

[13] T. Hasegawa et al.: J. Acoust. Soc. Am, 74 (1983) pp. 1044-1047.

[14] 城戸他: 2004年日本音響学会春季研究発表会 講演論文集, (2004) pp. 933-934.

[15] 長谷川他: 2003年日本音響学会春季研究発表会 講演論文集, (2003) pp. 1143-1144.

[16] Priyantha et al.: Proc. 7th ACM MOBICOM (2001) pp. 1-14.