特 集 環境発電

電磁波からのエネルギーハーベスティング技術とその応用

Energy Harvesting from Electromagnetic Waves and its Application

川原 圭博^{*1}

Yoshihiro KAWAHARA

Power supply is one of the key challenges for perpetual operation of electrical devices in Internet of Things (IoT) era. Low power electrical devices used at home are usually powered by coin cell batteries. However, the battery charging for such devices result in significant increases in operation cost. In this paper, we discuss feasibility of harvesting and storing a small amount of energy from ambient electromagnetic waves. A combination of an antenna and rectifier can be used to collect a few hundreds of microwatts of energy from several energy sources such as TV towers and microwave ovens. By accumulating this energy over time by a capacitor, it is possible to provide power to low-power devices and realize perpetual operation of such devices.

Keywords: radio frequency energy harvesting, internet of things, wireless sensor networks.

1 緒言

Internet of Things (IoT), すなわち、身の回りのあらゆるモノが計算能力と通信機能を持ちその情報がネットワークを通じて共有できるようになる時代が近づいている。IoT は生活シーンのあらゆる場面に大きな影響を与えうる極めて影響力の大きな概念である。

2014 年 1 月, Google は住居の部屋の温度をモニタリングしてエアコンの省エネ運転をおこなう「スマート・サーモスタット」を始めとしたスマートデバイスのメーカーNest 社を 32 億ドルで買収したと発表した。Nest のスマート・サーモスタットはユーザの行動から部屋の設定温度の好みを学習し, 温度調整を行うことを特徴としている。従来から無線を用いたサーモスタットは存在したが, スマートフォンレベルの処理能力の CPU を搭載し, 一昔前では巨大なサーバを用いなければできなかったような高度な学習を壁に取り付けた小さなデバイスで可能になった点が IoT 時代を感じさせる。Nest は Google による買収をきっかけにサーモスタット以外のホームネットワークの標準構築に向けて動き出している。Google 以外にも Apple も HomeKit と呼ばれるスマートホームプロジェクトを発足させ, Bluetooth を介した各種デバイスの制御フレームワークを提案している。こうしたスマートホームデバイスのフレームワークは省エネやホームセキュリティ, ス

マートフォンや AV 機器の協調によるコンテンツ視聴, 家電の消耗品サプライの自動注文など, プラットフォームを一旦握ればその後のビジネスへの影響力が大きな領域と言える。

家庭から一歩外に出てみれば, インフラの健全性モニタリングは日本の喫緊の課題と言える。首都高速道路を始め高度経済成長期以降に建築された橋や道路の老朽化が進んでいる。基本的なメンテナンスを繰り返していたとしても表面的には見つけにくい傷や小さな欠陥が年月を経て致命的な破壊へとつながることもある。小さな地方自治体が管理する構造物の場合には設計時の図面が残っておらず, 点検すらままならないケースもあるという。こうした問題に対して, ひずみセンサや加速度センサを構造物に取り付け, その固有振動数の変化を長期的にモニタリングすることで破壊の予兆を検知しようとする試みが現在熱心に実施されている。

また, 農業という一見して情報化とは縁遠い産業も現在急速に IT によるスマート化の波が押し寄せている。オランダは国土面積が日本の 50 分の 1 という狭小な国土でありながらもアメリカに次ぐ世界二位の農業輸出を誇っている。主要作物は植物工場で生産されるトマトやパプリカであり, これは温度, 湿度, 養分その他を工業化された巨大なビニルハウス内で自動化することで高い生産性を実現しているという。こうしたスマートアグリシステムはハウス栽培やいわゆる植物工場でなくとも, 節水や収量の向上, 作物の品質向上

連絡先: 川原 圭博, 〒113-8656 文京区本郷 7-3-1, 東京大学大学院情報理工学系研究科,
e-mail: kawahara@akg.t.u-tokyo.ac.jp

^{*1} 東京大学

のメリットが存在する。特に節水は世界各国で非常に大きな問題になっている。作付面積が問題にならないアメリカ等の大規模農業において実際に収穫量の限界を決めているのは散水可能な水の量である。水は農業だけでなく工業や生活にも必要な資源である。過剰な地下水のくみ上げは地盤沈下を引き起こし、河の水のくみ上げは下流域への影響が多いため「水の取り合い」が深刻な問題となっている。土壌水分や気象情報を細かい粒度で取得し、必要な場所に必要な量の灌水を最適なタイミングで行うことができればそれだけで農業のあり方が変わると言われている。

IoT がもたらす効用は枚挙にいとまがないが、それだけ社会にとってインパクトの大きなコンセプトであることを示している。IoT の実現には現在のところいくつかの大きな技術課題が存在する。ひとつめはコンピュータ自身の小型高性能化と低価格化である。この課題についてはムーアの法則が続く限りにおいては一定の楽観的な見方をできる。センサ情報をキャプチャし無線で送る基板は小型で高性能なものが次々と登場している。前述した Nest で採用しているプロセッサは Linux OS が稼働する。これは換言すれば 10 年から 20 年前であれば大型のデスクトップコンピュータでしか得られなかった計算資源が現在は手のひらに収まるようになったと言える。IoT 実現のもうひとつの課題はエネルギーの供給である。Fig. 1 は、1990 年から 2003 年までのディスク容量、CPU 速度、RAM、無線通信のスピード、バッテリーのエネルギー密度の伸びを記した図である[1]。明らかに蓄電池の性能は CPU スピードの伸びに追いついていない。スマートフォンは従来型のフィーチャーフォンに比べて格段に速い CPU を搭載し、OS やアプリケーションではより高度な処

理を行うことが可能になった代償として、充電が大きな足かせになっている。いくら容量の大きな電池を搭載したとしても数ヶ月間充電なしに動かし続けると言ったことは不可能に近い。この問題は、あらゆるモノにコンピュータを搭載したときにさらに顕著になる。各所に設置したセンサ群の電池を定期的に電池交換する必要があるようではシステムとしての実用性は高くない。

2 電磁波からのエネルギーハーベスティング

環境中に存在するエネルギーから電力を取り出し、機器の永久動作を目指す試みをエネルギーハーベスティングと呼ぶ。エネルギーハーベスティングの代表的なものは太陽電池である。その他に機械類であれば振動も有望なエネルギー源となりうる。熱を恒常的に発生させるものであれば環境との温度差からも発電可能である。センサ等の給電を考える場合、一般論としてはその計測対象が発するエネルギーをそのまま利用可能であればエネルギーハーベスティングは十分実用的なものになりうる。ただし、前述したような部屋の温度モニタリングや、橋梁モニタリング、農業センシングではそのような状況を満たすことは難しい。例えば太陽電池であっても屋内と屋外では単位面積あたりの発電可能な電力が 100 倍から 1000 倍程度異なることがざらである。また、橋の下やトンネル内部ではほとんど発電することもできない。さらに発電素子のコスト自身も無視できない。

電磁波からのエネルギーハーベスティングはこうした点で自由度の高いシステム設計をできる余地がある。電磁波は目に見えないものの、エネルギーや情報を遠方に伝える手段としてテレビやラジオ、携帯電話といった日常的な機器のアンテナから多く放射されている。こうした放送通信システムのみならず、電子機器や電子レンジからも少なからず電磁エネルギーが放射されている。アンテナを到来する電磁波の中に置くと、アンテナ素子上には起電力が誘起され、アンテナ端子間に負荷を接続すると電流が流れる。すなわち電磁波のエネルギーを電流に変換して取り出すことが可能である。通常こうして取り出せるエネルギーは非常に微小なものであるが、整流し、蓄電素子にしばらくの間蓄えることによってマイコンを駆動するのに十分なエネルギーとして利用することが可能である(Fig. 2)。しかも、アンテナは極端な話、単純な金属片でも作製可能である。そして整流回路はダイオードとキャパシタ

Fig. 1 Relative improvements in laptop computer from 1990 to 2003[1].

Fig. 2 RF energy harvesting wireless sensor network system.

の組み合わせで作製可能であるため、極めて低いコストで利用可能である。すなわち、通信機能を備えたハードウェアであれば、極めてわずかなコストアップで電磁波によるエネルギーハーベスティングの恩恵を受けることが可能である。さらに、環境中に存在する電磁波が必要な量より少ない場合でも、電磁波の送信源を設置して「無線給電」として利用することが可能である。電波は共有資源であることから、むやみに強い電波を出す送信源をおくことはできないが、機器にとって必要な電力を定量的に求め、法令に則って運用すれば極めて取り扱いのしやすい給電システムとなる。光や振動、熱の場合はこれを意図的に発するものを設置すると環境に与える影響が大きいが、電磁波であれば規定の強さ以下であれば最低限の影響でそうしたことが可能になる。

筆者の経験上、エネルギーハーベスティングを話題にするととき何となく懐疑的な技術であるという印象をもたれてしまうことがある。この原因は明らかで、(1)そもそも日常的に観測される電磁波の強度がそれほど強くはない、(2)通信用の電波を通信以外の装置で受けてしまうと、本来の通信システムに影響してしまいそうな気がするという二つの点に集約される。(1)については、次節以降定量的に論ずる。総論としては環境に存在する電磁波はそれほど強いエネルギーではない。具体的には数百 μW 以下のエネルギーしかえられないのが常である。しかしマイコン自身の低消費電力化により、それぐらいの電力でも様々な応用が可能な時代になって来ている。(2)については、本技術が基本的には遠方界での電磁エネルギーでのやり取りであることを理解する必要がある。おそらく最も有名な電磁誘導や電磁界共振を用いた無線給電システムは近傍界でのエネルギーのやり取りであり、エネルギーの送信側と受信側で相互に「見えている」関係が存在する。ところ

がマイクロ波帯でアンテナを用いた送受電は、基本的に送信アンテナと受信アンテナの距離が波長にして数倍以上離れた遠方界における現象であり、送信アンテナに取ってみれば、受信アンテナの有無が「見えない」状態にある。すなわち、送信アンテナから放射された電磁波は一部受信アンテナによって吸収されることもあれば、吸収されず永遠と地球上を伝搬し続け、やがて空気のような誘電体によって徐々に熱に変換されたり、あるいは、宇宙空間まで到達されるという形で消費される。テレビの電波塔から受信機までの見通し区間の間に壁のようにエネルギーハーベスティングを行う機器が無数に存在すれば結果として受信機への信号が減衰する可能性はある。しかし単にビルの壁等にまばらに貼付けられている程度であれば、本来熱になってしまっていたエネルギーを電気に変換したにすぎず受信機への影響は少ない。むしろ反射波を産まないことによりマルチパスと言った影響が軽減される可能性すらある。

Fig. 3は米国アトランタにおいてポータブルスペクトラムアナライザを用いて300 MHzから3 GHz帯までの電界強度を計算したときの測定結果である。屋内では窓からかろうじて入ってくるテレビ放送電波と、携帯電話の電波が際立って存在している。また無線LAN等の2.4 GHz帯の電波も昨今よく観測する電波である。屋外では遮蔽するものが無いために全体的により強い電波が観測される。FM ラジオ、テレビ、携帯電話、WiMAX といった放送通信システムがよく見られる電波の発生源である。

Fig. 3 RF measurement results in Atlanta, GA, U.S.A.

3 テレビ放送波からのエネルギーで自律動作するセンサノード

屋外で観測される電波のうちテレビ放送波と携帯電話の電波の電力密度は同程度に見えるものの、実際には携帯電話よりもテレビ放送波からのほうがエネルギーを回収しやすい。これは携帯電話の電波強度は端末の基地局からの距離の他に基地局での合計トラフィック、すなわちその基地局がカバーする範囲でどれだけの通信が発生しているかによって大きく変動するからである。基地局の範囲内のユーザの数と、一日の中の時間帯によってトラフィックが変動する。これに対してテレビ放送では、テレビ番組は深夜のメンテナンスを除いて一定の出力で電波が出されている。また、昨今の高画質を謳うデジタルテレビの放送規格においては OFDM などのサブキャリアを多数有する周波数利用効率が極めて高い変調方式を利用する。回収可能なエネルギーは、それぞれのサブキャリアの周波数の積分値として効いてくるため、他の規格と比べても桁違いに大きな電力を回収可能である。東京タワーからの電波から得られたエネルギーを 6.3 km 離れた東京大学本郷キャンパスにて計測したところ約 126 μW のエネルギーを回収することができている。

エナジーハーベスティングを行うデバイスを設計するにあたって最初に考慮すべきはアンテナの特性である。基本的に通信用のアンテナをそのまま利用可能である。テレビ放送のように電波の送出源が固定されたものであれば指向性の持つアンテナを用いた方がゲインを稼ぐことができる。そして、通信の場合は決まった通信システムのチャンネルだけを受信できれば良いが、エナジーハーベスティングではシステムによらず、電波が出ている周波数をすべてカバーするようなアンテナが望ましい。続いて整流回路である。入力信号の電力密度が低い場合、ダイオードの効率が必ずしも良くない点において動作させる必要がある。整流回路のインピーダンスは入力電圧で変化し、さらに出力端の直流負荷によっても変化する[2]。したがって効率を最大化したければあらかじめ負荷まで考慮したインピーダンスマッチングが必要になる。レクテナは出力が直流であるため、通常のアレーアンテナとは異なり、アレー化してもアンテナの指向性は合成されず、開口面積が素子数分ずつ増える。したがって、大きな面積を取れる場合は、無指向に近いアンテナ素子をアレー化することによって、無指向に近くどの方向から到来す

る電磁波でもほぼ一様に大電力で受電することが可能である。

120 μW という電力は、センサネットワークなどの IoT デバイスの動作に必ずしも十分であるとは言えない。ただし、こうしたデバイスにおいて消費する電力は処理の内容により大きく異なる。例えば、センシングと比べて、無線の送受信に要する電力は桁違いに大きい。データが小さければ、送受信にかかる時間は数ミリ秒と短い。テキサスインスツルメンツ社の MSP 430 に 2.4 GHz 帯の無線チップ CC2500 を接続し、温度を計測し数メートル離れた基地局にデータを送信する場合、一連の動作のすべての処理を終えるのに 25 ミリ秒で終了し、0.9 mJ 程度の電力量を使う。したがって、このセンシングがたとえば 3 分間に 1 回程度で十分であれば、平均して 5 μW (-23 dBm) のエネルギーがあれば良いという計算になる。3 分に 1 回というセンシングサイクルはたいていの環境モニタリングであれば実用上十分であると言える。

微弱な電力をじわじわキャパシタに溜めて、十分な電力が溜まった段階でマイコンを起動する、という操作は単純明快であるが、システムレベルで各所に気を配るとなかなか難しい問題を孕んでいる。リチウムイオンバッテリーのような 2 次電池を利用すると充放電回数による劣化が問題となり、寿命が短くなってしまいうという問題が生じるため、キャパシタを 2 次電池に代わる蓄電素子として用いる方が好ましい。一方でキャパシタは自然放電による漏れ電力による損失が大きい。この漏れはキャパシタの端子電圧に応じて指数関数的に増えるため、なるべく充電レベルを低く抑えることが重要になる[3]。ところが、充電量が十分でなくマイコンが電力不足に陥ると再起動が必要となり、スリープモードからの立ち上がりによって多くの電力を消費してしまう。そのため、漏れ電力の評価のみではなく、並行して回収電力の変動によって起動不能になるリスクを回避しなければ、必ずしも効率的な電力運用は実現されない。我々は、漏れ電力による損失に加え、電力不足で動作不能になることによる損失を求め、それらによる損失を総合的に評価し、最小化することで最適な残余電力量を導出した[4]。さらにこの最適な残余電力量は回収電力に応じて変わるため、動的に最適な残余電力量を変更する処理を行っている。これにより、短期的な回収電力の変動だけではなく、長期的な変動に対しても対応可能である。従来手法では、漏れ電力によって失われていた電力をセンサノードの駆

Fig. 4 RF energy harvesting system powered by a TV tower.

動に利用可能となり、さらに回収電力の短期的なノイズと長期的な変動の双方に対するロバスト性が確保することができた(Fig. 4)。

4 電子レンジの漏れ電波からの給電

家庭内において桁外れのエネルギーを得られるものの一つが電子レンジの漏れ電波である。電子レンジは 2.4 GHz の ISM 帯の電磁波を用いて誘導加熱により食品を温める調理器具である。庫内で発生した電磁波のうちいくらかの電磁波は正面のドアパネル等を通じて外に漏れる。この漏れ電磁波は食品を暖めることには寄与しないばかりか、他の ISM 帯の機器にとって干渉の要因となる。電子レンジの漏れ電波もレクテナを用いて整流し、電子機器の動作に用いることが可能である。

米国では FDA の CDRH (Center for devices and radiological health)により、電子レンジからのエネルギーの漏れの許容量が規定されている。電磁波の漏洩許容量の最大値は、Title 21, CFR, Part 1030 規定によると電子レンジの筐体から 5 cm の任意の点において出荷時で 1 mW/cm²、経年変化を考慮しても 5 mW/cm² とされている。筆者がジョージア工科大学内部に設置されている数台の電子レンジを調査したところ、漏れの平均電力密度としては 1 mW/cm² 以下に収まるものの、ダイポールアンテナを接続したスペクトラムアナライザによる計測結果では、-0.48 dBm (0.9 mW)のチャンネルパワーを記録した[5]。5 段ディクソンチャージポンプを実装し抵抗を接続したところ、約 0.54 mW の電力を回収することができた(Fig. 5, Fig. 6)。抵抗の代わりに 1000 μ F のキャパシタを装荷してエネルギーを溜めた場合は、120 秒間の運転で 9.98 mJ のエネルギーを溜め

Fig. 5 Five-stage Dickson Charge pump.

Fig. 6 Average power a charge pump has acquired from the microwave oven leakage.

Fig. 7 Summary of the available energy.

Fig. 8 Kitchen tools operated by microwave oven leakage.

ることができた(Fig. 7)。このエネルギーを用いることで、キッチン用の LCD パネル付きデジタル温度計などは無電源で動作した(Fig. 8)。Fig. 6に示すように、ド

アパネルから離れるにつれ、得られるエネルギーは急速に減衰する。ドアパネルから 1 m 離れた点では 10 μ W 以下まで減少してしまうが、どのぐらいのエネルギーがあれば、機器が動作するかは基本的には機器自身の消費電力とデューティサイクルによる。

5 結言

電磁波が持つエネルギーを放送や通信だけではなく、エネルギーを送り届けるためにも用いるというアイデアは昨今に始まったものではない。19 世紀末に交流による送電システムを実用化し、磁束密度単位として現代にも名を残しているニコラ・テスラもその発案者、そして最初の実証者の一人である。ニコラ・テスラは電力と情報を地球上の各家庭に無線で送り届ける「世界システム」を実証すべく、JP モルガンの支援を受けて、高さ 57 メートルのウォーデンクリフタワーを建設した。残念ながら資金不足などにより、そのアイデアが実用化することはなかった。電子デバイス自身の省電力化も相まって、ごくわずかなエネルギーでも様々な機器が動作するような時代がやってきた。マイクロ波帯の電磁波からのエネルギーハーベスティングは、IoT 機器のための給電システムとして、テスラの夢を 120 年越しで叶えるかもしれない。

参考文献

- [1] J. A. Pardiso and T. Starner, Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics, *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 4, No.1, pp. 18-27, 2005.
- [2] J. A. Hagerty, F. B. Helmbrecht, W. H. McCalpin, R. Zane, and Z. B. Popovic, Recycling Ambient Microwave Energy With Broad-Band Rectenna Arrays, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol.52, No. 3, pp. 1014-1024, 2004.
- [3] T. Zhu, Y. Gu, T. He, and Z. Zhang, eShare: a capacitor-driven energy storage and sharing network for long-term operation, SenSys '10: *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Oct. 2010.
- [4] R. Shigeta, T. Sasaki, D. M. Quan, Y. Kawahara, R. Vyas, M. Tentzeris, and T. Asami, Ambient-RF-energy- harvesting sensor node with capacitor-leakage-aware duty cycle control, *2012 IEEE Sensors*, pp.1-4, 2012.
- [5] Y. Kawahara, X. Bian, R. Shigeta, R. Vyas, M. M. Tentzeris, and T. Asami, Power Harvesting from Microwave Oven Electromagnetic Leakage, *Proc. The 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp. 373-382, 2013.