無給電インフラ監視センサプラットフォーム

代表研究者 金谷 晴一 九州大学大学院システム情報科学研究院

1 はじめに

道路、鉄道、空港、エネルギー施設等のインフラ、及び巨大構造物等の社会基盤において、老朽化や点検 不足が原因とされる事故・事例が社会的な大きな関心事となっている。今後の人口減の中で、無線センサ・ ネットワーク(IOT)を用いたインフラのモニタリングが急務の課題である。

このようなモニタリングシステムは長期間にわたって稼働することが求められており、一般に電池で駆動 される。すなわち、モニタリンスシステムの消費電力を特に考慮する必要がある。したがって有限の電池容 量であるため、モニタリングシステムは定期的に電池を交換するための追加のコストが必要となる。さらに 大型構造物に多数のモニタリングシステムを装着した場合においては、電池交換が困難か、または非実用的 である。

エナジーハーベスティング(環境発電)は、周囲の環境にすでに存在するエネルギーを集めることによっ てエネルギー問題の解決策を提供することができる。エナジーハーベスティングは、環境からのエネルギー を利用し、それを電気エネルギーに変換することである。収穫されたエネルギー源が大きく、継続的に(ま たは定期的に)利用可能である場合、センサノードは永続的に電力を供給され得る。このように、エネルギ ーは本質的に無限大である。

アンテナの観点からは、受信された電力を増加させ、送信アンテナとの不整合を排除するためにいくつか の構成が導入された。これらの構成のうち、円偏波アンテナは、直線偏波アンテナに比べ、位置ずれはほぼ 2倍の電力を受信する能力を有す。アンテナの最小化は、典型的なエナジーハーベスティングシステムにと って最も適切なアンテナ構成である。

提案システムのブロック図を図1に示す。送信機は、指定された共振周波数で、平均電力レベルで電磁信 号を放射する。信号は、同じ共振周波数で一定の帯域幅で動作するアンテナを使用して環境に放射される。 受信機側で受信された無線電力は、システムの最も重要なブロックである RF-DC 整流器を使用して DC エネル ギーに変換される。変換された直流電力は、比較的高い静電容量(0.1F)を有するスーパーキャパシタに蓄 積される。BLE ユニットはスーパーキャパシタに直接接続される。以下の各章では、すべてのユニットにつ いて詳しく説明する。

提案されたシステムは、円偏波アンテナと広帯域倍電圧 RF 整流器で構成されている。第二章では、アンテ ナ構造に焦点を当てながら、アンテナ設計手順を詳細に説明する。整流器の実験的な回路接続は第三章で説 明する。



図1 提案システムのブロック図

2スパイラルアンテナの設計及び評価

本研究では、スパイラルアンテを送受信アンテナとして選択した。スパイラルアンテナ構成は、高利得、 広帯域、円偏波、および簡単な構成のため、広帯域通信システムに広く使用されている。唯一の欠点は、平 衡-不平衡ポート変換を使用して広帯域にわたって整合を達成することが困難である給電構造である。

アンテナ構造として、対数型螺旋(logarithmic spiral)アンテナを応用した[1-3]。本アンテナは理論的 には非常に広い帯域にわたってアンテナ特性を有する。実際のアンテナにおいては、アンテナの上限周波数 と下限周波数を設定する。スパイラルアンテナの場合、ほとんどのアプリケーションでは、アンテナ裏面への放射を遮断するために単方向アンテナが必要である。そのためアンテナ裏面に放射板を接続した。

Rumsey はスケーリングが回転と等価であるという特性を満たす曲線を導き出した。この曲線は極座標で次のように書かれる[4, 5]。

$r(\theta) = e^{a\theta + b} (1)$

ここで、定数aは折り返しの速度を決定し、定数bは曲線をスケーリングである。対数周期ダイポールア ンテナ log-periodic dipole antenna (LPDA)のサイズは、周波数によって異なる放射特性を示す。アンテ ナの設計は三次元電磁界シミュレータ HFSS (Ansys)により行った。図 2(a)において、LPDA スパイラルア ンテナは2つの対極金属ストリップにより構成される。上部スパイラル金属ストリップが基板上側に実現さ れ、一方、180度回転された下部スパイラルが基板下側に配置される。二つの螺旋は対極アンテナを構成す る。同軸線路による給電は上部ストリップと下部ストリップの間で行わる。反射用メタルパッチは、基板か ら 15mm 下の距離に設定されている。これによりすべての後方放射を基板上面に反射することが可能となり、 利得は約 3dB 向上する。試作した LPDA の写真を図 2(b)に示す。



(a) LPDA のレイアウト



(b) 試作した LPDA の写 右図はコネクタ部

アンテナの測定結果とシミュレーション結果の比較を図3に示す。設計アンテナの反射特性を測定結果と 比較して図3(a)に示す。このアンテナは、1~3 GHzの広帯域特性を持ち、S11は6 dB 未満である。アンテ

図2 アンテナレイアウト、及び試作アンテナの写真

ナ利得の 3D 画像を図 3(b) に示す。本図よりアンテナ放射が z 軸方向(ブロードサイド) にあることが理解 できる。最大ゲイン(8.89dB)方向はブロードサイド(+ Z 方向、シータ= 0deg)である。周波数に対する アンテナ利得を図 3(c) に示す。どちらの結果も、約 2.45GHz で達成された最大利得とよく一致している。 アンテナ軸比(Axial Ratio, AR)は、円偏波アンテナの偏波を定量化するのに役立つ非常に重要なパラメ ータである。軸比は、楕円の長軸と短軸との間の関係である。ARを図 3(d)に示す。ARの実測値は帯域幅 270MHz



(d) ARの実測値と設計値

図3提案アンテナの実測値と設計値の周波数特性

3 整流回路の設計及び評価

で 2.45GHz 付近で 2dB 未満である。

本章では、整流回路の設計手順について説明する。整流回路は、回路シミュレーションソフトウェア (ADS、 Keysight)を使用して検証した。受信電圧と整流回路の間のインピーダンス整合回路は、出力電圧を上げ、 さらに反射と伝送損失を減らすために必要である。低電力であるセンシングアプリケーションの場合、整流 後に満足される主な目的は、最大量の電力を回収し、整流回路によって生じる電力損失を減らすことである。 印加電力が低いとき、回路素子に含まれる寄生素子により、整流回路の効率も低い。電力変換効率または RF / DC 変換効率 (η)は、最適なワイヤレス電力伝送のための重要な特性であり、次の式(2)のように計算さ れる。

$\eta = \frac{DC \text{ output power}}{RF \text{ incident power} - power \text{ loss}}$ (2)

電圧増倍器構造は、高周波無線信号を全波整流するため、RF-DC 電力変換システムの設計に適している。 図4に従来型全波整流回路を示す。図4の電圧増倍整流器はコンデンサCとダイオードD1によって整流され たピークを形成し、一方電圧クランプはD2とCによって形成される。本回路は倍電圧器とも呼ばれ、理論上 の出力電圧は入力電圧の約2倍となる。無線入力信号は、正のサイクルの間に整流される。また負のサイク ルの間に入力コンデンサC1に蓄積された電圧は、無線入力信号の次の正のサイクルの間に出力コンデンサ C2に伝達される。したがって、C2の電圧は、無線信号のピーク電圧の約2倍からダイオードのターンオン電 圧の2倍を引いたものである。



図4 基本的な整流回路の回路図

より高いDC出力電圧レベルを達成するために、1つの倍電圧回路を縦続接続でn段に拡張することができる。各ステージは直列に接続され、カスケード接続されたDC電源と同じように動作し、出力電圧を増やすことが可能である。



(a) 整流回路のレイアウト

(b) 製作した整流回路の写真

図5 整流回路のレイアウト及び試作写真

作製した RF-DC 整流回路のレイアウトを図 5(a) に示す。インピーダンス整合回路は、RF-DC 変換効率を向 上させるための重要な要素である。整流回路にはショットキーダイオード SMS-7630(Skyworks) を選択した。 インダクタとマイクロストリップラインは入力インピーダンス整合回路に使用され、コンデンサは DC ブロッ クコンデンサと DC フィルタコンデンサに使用される。整流回路の寸法は非常にコンパクトであり、Coplanar Wave Guide (CPW) フィードラインを有するアンテナと容易に一体化することができる。本回路では、整流器

31 mm

は 50 Ωの同軸コネクタを使用してアンテナに接続されている。整流器の性能を向上させるために、広帯域に インピーダンス整合されている。整流回路の試作写真を図 5(b) に示す。

4 エネルギーハーベスティングシステムの測定結果

アンテナと整流回路の統合のために、アンテナのインピーダンスパラメータをエクスポートし、それを ADS ソフトウェアの整流器の入力インピーダンスとして導入することにより行った。回路の設計の妥当性を証明 するために、アンテナと整流回路を一体化した場合の実験結果と設計結果を比較した。図6に測定結果を示 す。図6(a)は広帯域周波数において、各周波数における整流回路の電力効率の入力電力依存性を示す。図 6(b)は、各入力電力における、電力効率の周波数特性を示す。各周波数において、入力電力-15dBm以上で 回路が動作し、0dBm以上では、40%以上の電力効率が実現できた。



図6 広帯域周波数における整流回路の出力特性

5 無給電センサプラットフォームの実証実験

前章にて開発したアンテナ及び整流回路に温度及び湿度センサと、BLE 通信ユニットとを接続し、無給電 における、センサプラットフォームの実証実験を行った。全体のブロック図を図7に示す。無線信号送信器 はRFは、Keysight Technologiesのファンクションジェネレータと送信用スパイラルアンテナで構成されて いる。図7の左側が受信部分である。受信部分は、整流器に接続された受信用スパイラルアンテナ(送信ア ンテナと同一)を用いて構築されている。受信電力は約-1 dBm である。続いて、0.1Fのキャパシタが整流回 路の出力に接続されている。BLE ユニットには温度及び湿度センサが接続されている。BLE ユニットに入力さ れる DC 電圧をモニタするためにデジタルボルトメータを接続した。



図7 BLE ユニット、センサユニットとアンテナ・整流回路の実験系



(a) 測定系全体の写真



Receiving mode

idle mode

(b) ノート PC の USB ポートに挿入された BLE 受信ユニット

図8無給電センサプラットフォームの測定系の写真

図8に測定系の写真を示す。図8(a)より通信距離は1.2mである。測定データは1分間隔で、PCに転送される。図8(b)はノートPCのUSBポートに接続されたBLE受信ユニットである。idle mode では、ユニット 右側の赤色のLEDが点灯する。データを受信した場合(receiving mode)、ユニット左側の青色のLEDが点灯 する。本システムを用いて24時間にわたる無給電実験を行った。BLE入力端子でモニタされる整流回路の出 力電圧値を図9に示す。図9より、BLEの通信開始時、すなわち最初のreceiving mode においては、DC電圧 は1.97 Vに低下する。しかしながら、idle mode においては、約100~120 mVの電圧がスーパーキャパシタ に充電される。これにより、スーパーキャパシタに充電された電圧により、電池レスでセンシングと通信が 可能となった。BLE モジュールは、検知した温度と湿度のデータを10秒間隔でPCに送信される。

図 10 は PC 画面に表示されるセンシングデータのキャプチャである。図より、温度、湿度はもちろんのこと、BLE 受信強度から、センサと PC 間の距離もあわせて計測することができた。



図9 BLE ユニットの電圧の時間変化



(b) 湿度の温度の時間変化



(c) 通信距離

6まとめ

本研究では、BLE に給電するための長距離 RF エネルギーハーベスティング用レクテナの開発を行った。円 偏波アンテナと整流回路を統合し、さらにセンサと BLE システムを一体化することにより、無給電インフラ 監視センサプラットフォームを実現した。本システムにより、無線信号の受信により、温度・湿度、及びセン サと測定用 PC 間の通信距離のリアルタイム測定に成功した。今後はアンテナと整流回路路の高効率化、及び 高利得化により、通信距離の更なる増大を目指す。

【参考文献】

- H. Nakano, K. Kikkawa, Y. Iitsuka, and J. Yamauchi, "Equiangular spiral antenna backed by a shallow cavity with absorbing strips," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 56, no. 8, pp. 2742-2747, Aug. 2008.
- [2] J. J. H. Wang and V. K. Tripp, "Design of multioctave spiral-mode microstrip antennas," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 39, no. 3, pp. 332-335, Mar. 1991.
- [3] W. Fu, E. R. Lopez, W. S. T. Rowe, and K. Ghorbani, "A planar dual-arm equiangular spiral antenna," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 58, no. 5, pp. 1775-1779, May 2010.
- [4] Curty, J.; Joehl, N.; Dehollain, C.; Declercq, M. Remotely powered addressable UHF RFID integrated system. IEEE J. Solid State Circuits 2005, 40, 2193-2202.
- [5] 1. P.E. Mayes, "Frequency-independent Antennas and Broadband Derivatives Thereof," Proceedings of the IEEE, Vol. 80, 1982: 103-112.

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
600GHz wideband planar array antenna on a chip	Proc. SPIE 10917 photonics west 2019, 109171P (8 pages)	2019/3
Enhanced Broadband RF Differential Rectifier Integrated with Archimedean Spiral Antenna for Wireless Energy Harvesting Applications	Sensors 2019, 19(3), 655 (13 pages)	2019/2
Impedance-matched Planar-antenna-integrated High-efficiency Push-pull Power Amplifier with Center-tapped Transformer for 5 GHz Wireless Communication	Sensors and Materials, Volume 30, Number 12(2) pp. 2969-2978	2018/12
Dual-band differential outputs CMOS Low Noise Amplifier	Proc. of the 20th Electronics Packaging Technology Conference, pp. USB_1-4	2019/12
Wideband slot array antenna for 1 THz band imaging device	Proc. of the 20th Electronics Packaging Technology Conference, pp. USB_1-4	2019/12
A Low-Power and GHz-band LC-DCO Directly Drives 10mm On-chip Clock Distribution Line in 0.18um CMOS,	IEICE Transactions on Fundamentals Vol.E101-A, No.11, pp.1907-1914	2019/11
A High-frequency, Low-Coupling 8-shaped Differential Inductor with Patterned Ground Shield	Microwave and Optical Technology Letters, Vol.60, Issue 11, pp.2704-2707	2019/11
Design of A Phased Array Antenna for Indoor Positioning System	Proc. 2018 Asia-Pacific Microwave Conference, pp.1-3	2019/11
Effect of Subthreshold Slope on Sensitivity of MOS-HEMT Square Law Detector for THz Waves	Proc. IEEE TENCON 2018, pp.1055-1058	2019/10
360°Phase Shifter Design Using	IEEE Microwave and Wireless	2019/8

〈発表資料〉

Dual-Branch Switching Network Components Letters, Vol. 28, Issue 8, pp.675-677	Dual-Branch Switching Network	Components Letters, Vol. 28, Issue 8, pp.675 ⁻⁶⁷⁷	
---	-------------------------------	---	--