

放送波のエネルギーを利用したバッテリーレスワイヤレス通信に関する研究

元日大生産工 (学部) ○渡邊 勇樹 元日大生産工 田中 将義

1 まえがき

様々なモノにセンサを取り付けデータを収集する, いわゆるIoT (Internet of Things) が普及している. これらのBig dataを解析することで, これまで得られなかった新たな情報が入手可能となる. IoTに使用されるワイヤレス通信端末は信号線や電源線を必要としないため, 敷設工事の短縮や設備の費用削減が期待できる. しかし, バッテリーが切れると通信ができない. 人手が届きにくい僻地や橋梁の高所などではバッテリーの保全, 維持が難しい課題がある.

一方, 省エネルギー対策として, 身の回りに有るわずかなエネルギーを電力に変換して活用するEnergy Harvestingが注目されている. 筆者等は, 太陽光発電と併用して圧電素子を用いて歩行時の運動エネルギー回収するハイブリッド給電によるユビキタス通信^[1-2], ならびに非常災害時の通信手段確保を目的として, 握力でエネルギーを生成するバッテリーレスワイヤレス通信システムを開発してきた^[3].

さらに身の回りにある環境電磁波のエネルギーを回収する検討も進められている^[4-7]. 受信電力が極めて小さいために, 特別なアンテナや整流器の開発が行われている^[5-7].

本研究では, IoTセンサの電源確保を目的として, 環境に放射されている電磁波のエネルギーを回収して利用するEnergy Harvesting型のワイヤレス通信端末の検討を行った. 特別なアンテナや整流デバイスを使用せず, 既存の部品を使用した簡易な構成を検討した. この結果, VHF帯放送波のエネルギーを回収して動作するワイヤレス通信端末を開発し, これを用いて加速度センサのワイヤレス伝送を実現した. 本報告では, このシステム構成, 設計法および実験結果について報告する.

2 研究システムの概要

システムの概要をFig. 1に示す. 本研究では建造物等のインフラ設備倒壊の前兆を感知し,

事前に周囲に危険を通知する「建造物倒壊前兆警報システム」への適用を目的としている.

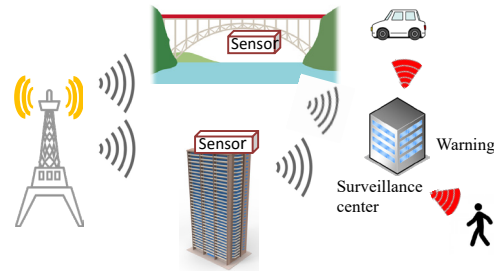


Fig. 1 Infrastructure warning system employing broadcasting wave energy harvesting.

本ワイヤス端末の構成をFig. 2 に示す. 受信アンテナで到来電磁波を受信し, 整流してキャパシタCtに充電する. 本端末は, Fig. 3 に示すように, Ctへの充電と放電を繰り返しCtに蓄えられたエネルギーを利用して通信端末を間欠動作させる.

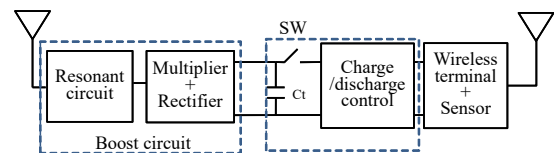


Fig. 2 Configuration of battery-less wireless communication system using broadcasting wave energy.

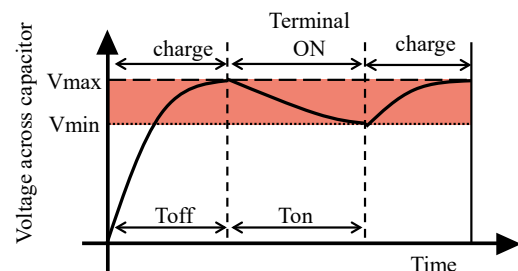


Fig. 3 Voltage profile across capacitor (Ct) for intermittent data transmission

Study on Battery-less Wireless Communication Using Energy Harvesting
from Broadcasting Wave

Yuki WATANABE and Masayoshi TANAKA

以下に動作原理を順に説明する

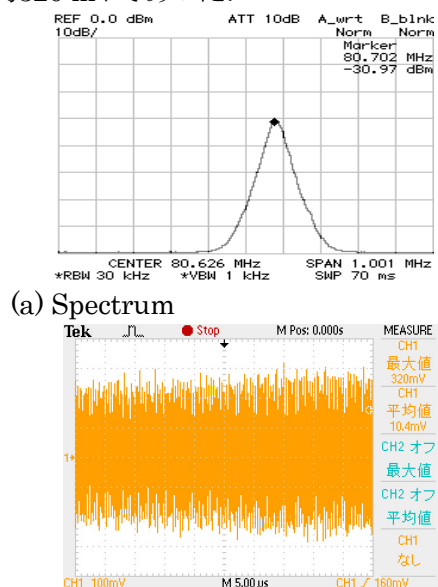
- ①共振回路で放送波の受信電圧を昇圧し、次段の多倍圧整流回路(Multiplier+Rectifier)で使用するダイオードを動作させる。
- ②多倍圧整流回路で整流をしながら、通信端末の動作する電圧まで昇圧させ、キャパシタCtに充電を行う。
- ③キャパシタの充電電圧が規定の電圧Vmaxに達すると充放電制御回路により自動的にSWを閉じ、無線端末モジュールにエネルギーを供給する。
- ④ワイヤレス通信モジュールとセンサが動作し、センサからのデータを送信する。
- ⑤通信によるエネルギー消費の結果、キャパシタ電圧が低下し、規定の下限電圧Vminに達すると充放電制御回路がSWを開き通信を停止し、再びキャパシタへの充電を開始する。

以上の動作を繰り返し行い、間欠通信を実現する。

3 システム設計と製作

3.1 環境電磁波の実測例

建物の窓際で環境電磁波を直径16.5cmの小型ループアンテナを使用して測定したデータをFig. 4(a) に示す。FM 放送波(80.7MHz)を受信した時のスペクトラムを示している。受信電力は-31 dBm($=0.8 \mu\text{W}$)である。また、その時の開放電圧の波形をFig. 4 (b) に示す。ピークで約320 mVであった。



(b) Voltage waveform.

Fig. 4 Spectrum and voltage waveform of received FM broadcasting wave.

3.2 昇圧回路の設計

昇圧回路(Boost circuit)は、Fig. 2 に示

すように共振回路と多倍圧整流回路から構成される。環境電磁波のピーク電圧値が約320mV、ワイヤレス通信端末の動作電圧が3.6Vであるので、本昇圧回路で12倍以上に昇圧させる必要がある。

そこで、昇圧回路では、最初に受信波を共振させて電圧を高め、その後、多倍圧整流回路で昇圧する構成とした。

多倍圧整流回路はキャパシタとダイオードを n 段組み合わせることで、入力電圧を n 倍に高め、整流する回路である。入力電圧が小さいため、ダイオードは立ち上がり電圧が小さく、動作の速いショットキーバリアダイオードを使用した。

3.2.1 共振回路

本回路では、特定の周波数(共振周波数)において、回路のリアクタンスが0になり、インピーダンスが抵抗成分のみになり最小となる共振現象を利用している。この時、リアクタンスの両端の電圧が Q (共振回路の尖鋭度) 倍に増加する。

アンテナ、接続線路と多倍圧整流回路のリアクタンス成分と挿入したインダクタで共振状態と共振周波数の制御を行う。この様子をFig. 5に示す。

Fig. 6に、Fig. 5に示す点の入力側と出力側のインピーダンス (S パラメータの S_{11}) を示す。入力側と出力側の S_{11} が複素共役の関係となる周波数で、共振する。

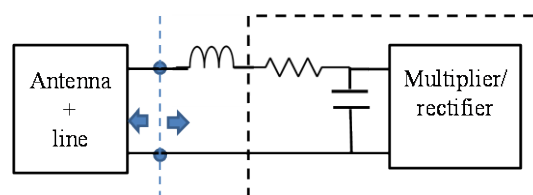
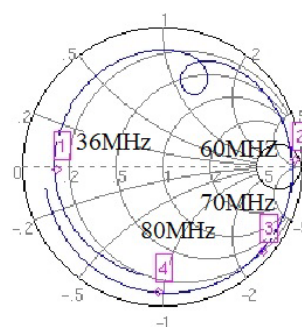
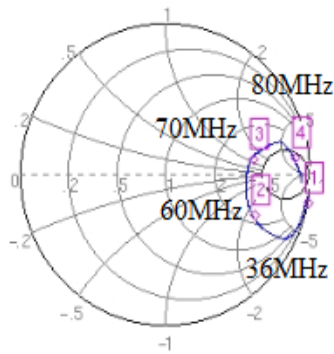


Fig. 5 Resonance control using series inductor.



(a) S_{11} parameters of input side.



(b) S_{11} parameters of output side
Fig. 6 Impedances of resonant circuit

3.2.2 多倍圧整流回路(Multiplier/Rectifier)

多倍圧整流回路の構成をFig. 7 に示す. ダイオードとキャパシタからなる4段構成である. C_t は無線モジュールに電圧を供給するキャパシタであり, $1000\mu\text{F}$ と 1F を使用した. Fig. 8 に製作した多倍圧整流回路の上面を示す. 裏面に $1\mu\text{F}$ のチップキャパシタを実装している.

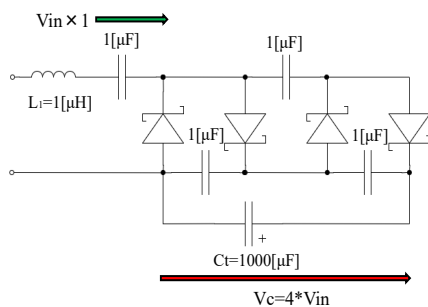


Fig. 7 Configuration of four-stage boost circuit.

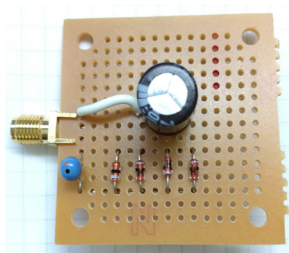


Fig. 8 Top view of four-stage boost circuit.

4 実験結果

4.1 充電時の周波数特性と過渡応答

放送波を模擬した試験用発振器から電波を放射して, Fig. 2 の回路で受信電磁波のエネルギー回収実験を行った. Fig. 9 に示す直径 16.5cm の小型ループアンテナ(MK-5S)を使用し, 受信電力を -30 dBm とした. 試作回路を 70MHz で共振させた時の充電時の周波数特性(未飽和時)をFig. 10 に示す. 共振時の過渡応答をFig. 11 に示す. 約 25 秒で通信端末が動作する 3.6V

に達し, 約 225 秒で飽和し, その時の電圧は 9.4V であった.

4.2 加速度センサ伝送実験

昇圧回路のキャパシタ C_t と並列に加速度センサ内蔵 2.4GHz 帯無線モジュール(TWE-LITE-2525A)をFig. 12 に示すように接続し, センサ出力(加速度データ)の送信を行った. データサンプル間隔は 50ms , 送信速度は 250kbps , 送信出力は $+2.5\text{dBm}$ である. この結果, 450ms の間, 50ms 間隔で加速度データの送信を実現した. この時の3軸加速度データの送信結果をFig. 13 に示す. x , y , z の値がそれぞれの軸の加速度を示している. C_t の値を 1F に変更した時の通信状況を含めて, 通信性能をTable 1 に示す. C_t を大きくすると, 伝送時間を拡大できるが, 充電時間が長くなる.



Fig. 9 Loop antenna (MK-5S) used for receiving radio wave

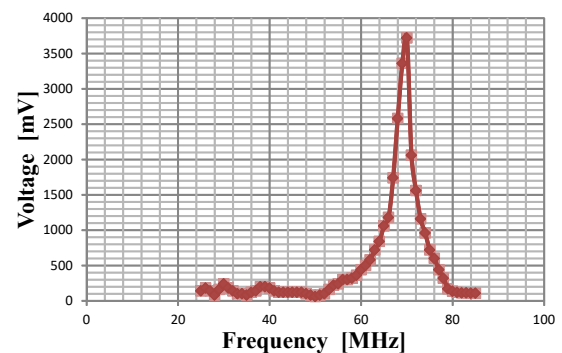


Fig. 10 Frequency characteristics of boost circuit

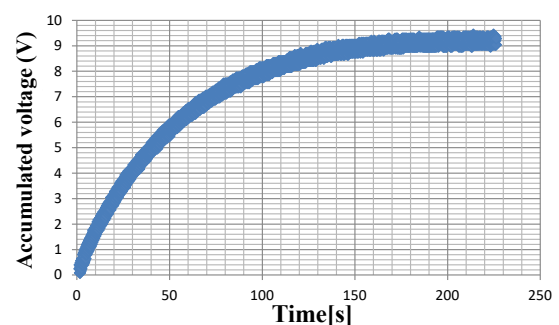


Fig. 11 Transient response during charging.

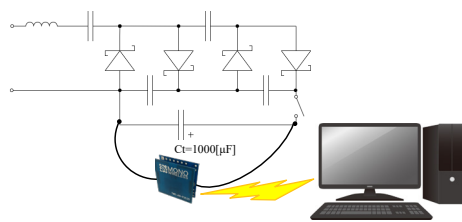


Fig. 12 Wireless module with accelerometer attached to the circuit.

```

::ts=467
::rc=80000000:lq=90:ct=0002:ed=8102097A:ld=0:ba=2880:a1=1309:a2=0639:
x=0002:y=-018:z=-102
::rc=80000000:lq=93:ct=0003:ed=8102097A:ld=0:ba=2785:a1=1355:a2=0656:
x=0011:y=-028:z=-102
::rc=80000000:lq=87:ct=0004:ed=8102097A:ld=0:ba=2650:a1=1353:a2=0653:
x=0017:y=-027:z=-104
::rc=80000000:lq=84:ct=0005:ed=8102097A:ld=0:ba=2540:a1=1345:a2=0646:
x=0014:y=-022:z=-100
::rc=80000000:lq=72:ct=0006:ed=8102097A:ld=0:ba=2425:a1=1326:a2=0639:
x=0006:y=-032:z=-096
::rc=80000000:lq=63:ct=0007:ed=8102097A:ld=0:ba=2320:a1=1309:a2=0627:
x=0023:y=-018:z=-085
::rc=80000000:lq=48:ct=0008:ed=8102097A:ld=0:ba=2210:a1=1283:a2=0615:
x=0033:y=-028:z=-097
::rc=80000000:lq=48:ct=0009:ed=8102097A:ld=0:ba=2105:a1=1263:a2=0605:
x=0007:y=0000:z=-134

```

Fig. 13 Acceleration data transmitted by radio wave energy harvesting battery-less wireless terminal.

Table 1 Communication time versus capacitance of Ct

Capacitor Ct	Sample period (s)	Number of data points	Communication time (s)
1000μF	50m	9	0.45
1 F	50m	8800	440

5 ワイヤレス給電への発展

本研究では、放送波の電磁波エネルギーを回収し、そのエネルギーを利用してセンサデータのワイヤレス伝送の検討を行った。放送局からの距離が遠くなると、受信電力が低下し、エネルギー回収が難しくなるため、適用領域が限定される。このような場合には、センサ信号受信局（親局）から本通信端末に向けて電磁波を必要な時に放射して、センサデータを受信するワイヤレス給電方式が可能となる。この方式の利点は、微弱な電波を使用し、かつ周波数を可変でき、端末の共振周波数変動に対応できることであり、端末の回路の簡易化に有効である。

6 まとめ

本研究では放送波の電磁波エネルギーを回収し、このエネルギーを使用してセンサデータをワイヤレス送信するIoT用通信システムを開発した。

FM放送波をエネルギー源として、共振回路と多倍圧整流回路を用いて昇圧と整流を行った。回

路に挿入したインダクタでインピーダンス調整して共振を発生させ、微弱な電力（ $-30\text{dBm}=1\mu\text{W}$ ）から端末の動作電圧 3.6V まで昇圧を行い、加速度センサ内蔵の無線モジュールを動作させた。

実験を行った結果、 70MHz で共振させた場合、 $C_t=1000\mu\text{F}$ の時、約25秒で通信端末の動作に必要な電圧を得ることができ、 450ms の間、センサデータの伝送を実現した。 $C_t=1\text{F}$ では、 440s 間のデータ伝送を実現した。

本システムは外部から微弱な電磁波を吹き付けるワイヤレス給電にも対応可能である。

以上のことから到来電磁波からエネルギーを回収し、バッテリーを使用しないEnergy harvestingを実現するワイヤレス通信システムの実現の見通しを得た。今後の課題として、共振現象を利用しているため、僅かなりアクタンス変動で、特性が変化する。安定化のための対策が必要である。

「参考文献」

- 1) 飛内 秀典, 田中 将義, バッテリーレス圧電/太陽電池ハイブリッド電源を用いたユビキタスワイヤレス通信に関する研究, 電子情報通信学会, 総合大会, B-20-2, 2009.
- 2) 福島 悠平, 田中 将義, バッテリーレス・ワイヤレス双方向位置情報通信システムの検討, 電子情報通信学会, 総合大会, B-19-10, p633, 2012.
- 3) 渡邊 啓佑, 田中 将義, 被災者探索救出用バッテリーレスワイヤレス通信システムに関する研究, 電子情報通信学会, 総合大会, B-15-6, 2017.
- 4) 大窪 健作, 田中 将義, 環境電磁波をエネルギー源とするユビキタス・ワイヤレス通信の検討, 電子情報通信学会, 総合大会, B-20-31, p626, 2011.
- 5) C. Mikeka, H. Arai, Development of a batteryless sensor transmitter, IEEE, Radio and Wireless Symposium (RWS), 2010
- 6) 北沢, 鴨田, 伴, 久々津, 小林, 放送, 通信に用いる3周波数帯からの電磁波エネルギーの回収. 信学技報 113(70), 53-58, 2013
- 7) 川原, 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, 日本AEM学会誌, Vol. 22, No. 3, p. 380-385, 2014