

高効率 RF-ID 用マイクロ波受電素子の開発

周 艶 篠原 真毅 三谷 友彦

京都大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

E-mail: {yan_zhou, shino, mitani }@rish.kyoto-u.ac.jp

あらまし ユビキタス社会を実現するために、RFID を含め多くの基盤技術が開発されている。RFID タグはセンサーネットワークにお互いに動作し、記録されたデータをリーダーへ送り、読み書きされる。RFID センサーネットワークは農業、医療、物流など多くの分野で応用が期待される。日本の電波法によって、規格 RCR STD-1 における最大電力密度は $1\text{mW}/\text{cm}^2$ であり、RFID が受け取る電力が小さい。そのため、整流回路の効率が低くなるという問題点がある。そこで、RFID タグの整流効率を向上するために、高いインピーダンスのアンテナとレクテナを提案する。本研究は ISM バンドにおける 2.45GHz において検討する。インピーダンスを高くすると、アンテナの放射損失と整流回路の線路損失が増加するため、これらの損失について検討しなくてはならない。本稿では、 50Ω 以上の RFID タグをシミュレータを用いた整流効率を比較することにより、最適なインピーダンスを得ることを目標としている。

キーワード 高インピーダンスアンテナ, 方形パッチアンテナ, 整流回路, RFID センサーネットワーク

Development of a Highly-efficient Receiving Element for RFID

Yan Zhou, Naoki Shinohara and Tomohiko Mitani

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011 Japan

E-mail: {yan_zhou, shino, mitani }@rish.kyoto-u.ac.jp

Abstract In order to realize ubiquitous sensor network society, RFID, as one of the basic technique, has succeeded in mutual cooperation sensor network. RFID sensor network can be used in agriculture, medical welfare, distribution, etc. The maximum power density that supplied for RFID tag in Japan is $1\text{mW}/\text{cm}^2$, so the power RFID tag received is limited. It means the rectifier circuit will be different to have high efficiency. Therefore, we propose a high impedance patch antenna and rectenna circuit instead of using the Cockcroft Walton circuit to obtain a highly-efficient RFID tag. A passive RFID tag at 2.45GHz ISM band is appropriate. Losses of antenna and microstrip line in rectenna circuit must be taken into consideration. We compare the loss and efficiencies of the antenna and the rectenna circuit while using higher impedance than 50ohm . Then, we can obtain the optimized impedance.

Keyword high impedance antenna, rectangular patch antenna, rectification circuit, RFID sensor network

1. 研究背景・目的

センサーネットワークとは、周りの環境における温度や湿度などの情報を得て、相互に情報交換することである。RFID はセンサーネットワークにおいて欠かせない技術である。RFID が幅広い分野で応用される。ここで、農業に応用する一例を挙げる。RFID タグは水田や畑などに設置し、土壌の情報を収集し、無線ネットワークを用いて、データ管理仕組みを構築することができる。そこで、収集される情報を分析し、よい農作物を育てる環境が分かる。これにより、農作物の産量が上がると期待される。

先行研究[1]では2分割マイクロストリップ3端子アンテナと受電昇圧整流回路を用いた温度センサ付きパッシブ無線タグが提案されている(図1)。アンテナで得られた電力を、タンク回路と昇圧回路を並列共振させることによって高効率な整流を可能としている。本研究では、インピーダンスの高いアンテナを用いることでタンク回路を省略し、整流回路を簡素化にする無線タグを提案する。無線タグの受信電力は 100mW 級と小さいため、ダイオードにかかる電圧は小さくなってしまいが、アンテナおよび整流回路を高インピーダンス化することによって高い電圧を励起することが可能であると考えられる。

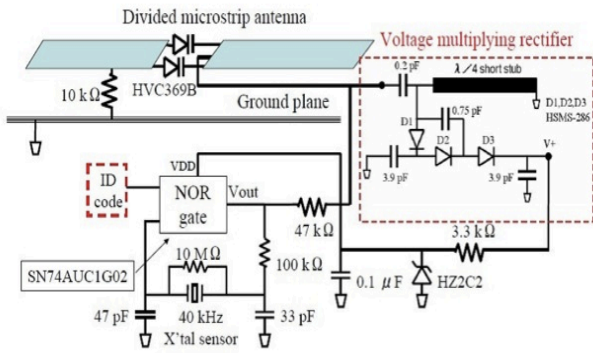


図1 先行研究で提案されている無線タグ

2. 電波法における RCR STD-1 規格について

入力電力が変わることによって整流回路の効率が変わる。そこで、アンテナから受け入れる電力のレベルを調べる必要がある。RCR STD-1 により [2]、2.4GHz 帯における電波防護の基準値は電力密度 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ が基準となる。また、アンテナの最大出力電力は 300mW 、アンテナの最大絶対利得は 20dBi である。この基準に基づいてアンテナの受け入れる電力レベルが式(1)で計算できる。

$$P_{\text{input}} = \frac{\lambda}{4\pi} \times 10^G/10 \times 1\text{mW}/\text{cm}^2 \quad (1)$$

ここで、 λ は波長、 G はアンテナの利得、 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ は電力密度である。これにより、アンテナが受け入れる電力は 100mW 級以下と計算できる。

3. 方形パッチアンテナ

パッチアンテナは多くの優れた特性を持つため、様々な分野で応用されている。パッチアンテナは周波数と基板のパラメータにより小型化なアンテナを設計できる。また、パッチアンテナは円形、方形などの多様な形に簡単に設計し、シミュレーションを行う。

本研究は方形直線偏波パッチアンテナを設計し、アンテナの放射効率について検討を行う。インピーダンスを高くすると給電線路の幅は細くなるため、実際の製作は難しい。そこで、給電線路の幅を一定(3mm)に設計し、線路とパッチを一体にみなすことによって、シミュレーションを行う。

アンテナのサイズと放射パターンは基板によって異なるため、使用する基板の選択は重要なポイントである。本研究は表1に示されるパラメータの基板をモデルとしてシミュレーションを行う。基板上マイクロ波の波長は真空中より短くなる。式(2)から実効波長を計算できる。

$$\lambda_{\text{eff}} = c/(f\sqrt{\epsilon_r}) \quad (2)$$

ここで、 f は周波数、 ϵ_r は比誘電率、 c は光速度である。パッチアンテナとグランドは誘電体装荷空洞と磁気側壁に扱うことができるため、アンテナの共振インピーダンスが予想できる[3]。方形パッチアンテナの場合、最低共振周波数は式(3)で計算できる。

$$f = c/(2d\sqrt{\epsilon_r}) \quad (3)$$

ここで、 d は給電点からアンテナエッジまでの距離である。電磁界シミュレータ HFSS におけるアンテナモデルを図2に示す。アンテナのサイズは $1/2\lambda_{\text{eff}} \times \lambda_{\text{eff}}$ 近くの範囲で変化させた。表2に詳しい値を示す。

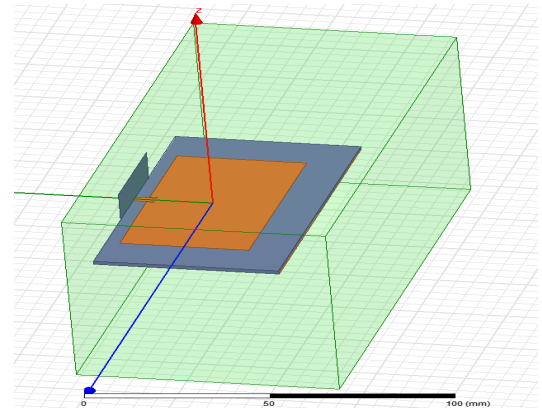


図2 方形パッチアンテナのレイアウト

表1 基板のパラメータ

符号	量	値
ϵ_r	相対誘電率	2.6
$\tan \delta$	誘電正接	0.002
$conductor$	伝導率	$5.8\text{e}7$ siemens/m
H	基板の厚さ	1.6 mm
T	導体の厚さ	0.018 mm

表2 方形パッチアンテナのサイズ

インピーダンス [ohm]	パッチのサイズ [mm^2]	基板のサイズ [mm^2]	給電線路の長さ [mm]
50	36.2×70	52×100	5.85
100	35.8×70	52×100	6.1
150	35.6×70	53×100	7.2
200	35.2×72	49×100	10.2
400	35×72	50×100	11.5

4. 方形パッチアンテナの放射効率

アンテナに入力された電力は、電波を放射するまでに様々なエネルギーとして消費される。ポートのところでアンテナに給電された電力を給電電力と定義する。アンテナから反射された電力を反射電力と呼び、アンテナに伝わった電力を有効電力とする。伝わった電力はアンテナから放射した電力とアンテナで損失された電力に分ける。これら電力の関係式は式(4)と式(5)で表される。

$$P_{incident} = P_{ref} + P_{loss} + P_{rad} \quad (4)$$

$$P_{acc} = P_{incident} - P_{ref} \quad (5)$$

ここで、 $P_{incident}$ は給電電力、 P_{ref} は反射電力、 P_{loss} は損

失電力、 P_{rad} は放射電力、 P_{acc} は有効電力である。そこで、有効電力と放射電力によりアンテナで損失された電力を計算できる。図3からアンテナのインピーダンスが変化しても放射損失はほぼ同じ程度であることがわかる。また、図4のようにアンテナの放射パターンの差異も小さいことが分かる。

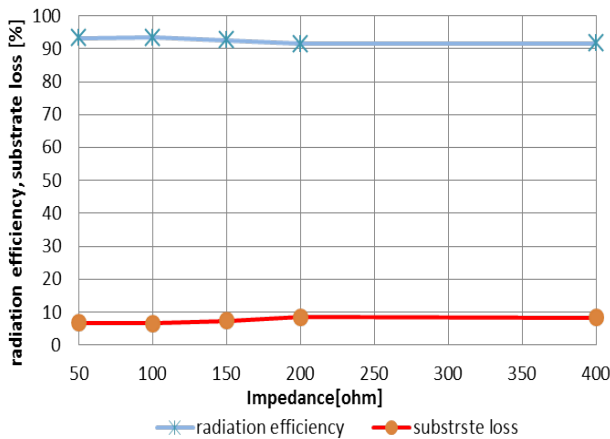


図3 インピーダンスと放射効率および基板損失の関係

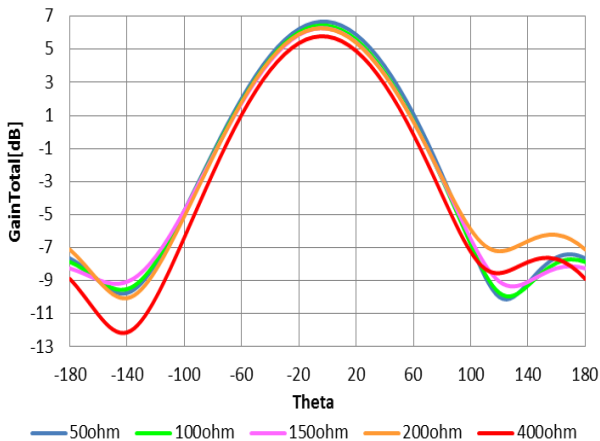


図4 インピーダンスと放射パターンの関係

5. 高インピーダンス整流回路

次に図5で示す整流回路を用いて入力インピーダンス異なる整流回路の効率について検討を行う。この整流回路は整合線路、直流結合コンデンサ、整流ダイオード、 $1/4\lambda$ 線路と平滑コンデンサによって構成される[4]。理想的に、ダイオードの損失は0であれば、整流回路の効率が100%までに実現できる。しかし、実際にダイオードの抵抗と立ち上がり電圧により効率が大きく下がる場合は多い。そこで、高い入力インピーダンスを用いてダイオードに印加される電圧を上げることで、整流効率が向上できると考えている。

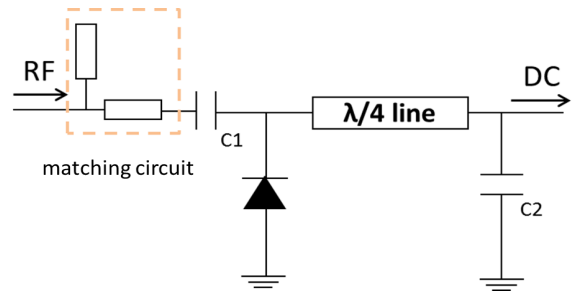


図5 整流回路のレイアウト

6. 整流回路における線路の損失

マイクロストリップ線路のインピーダンスが高くなると、線路の幅が細くなり、線路損失が上がる可能性があると考え、ADSを用いることで異なるインピーダンスの線路損失を比べる。ADSでシミュレーションする基板パラメータは表1に表されたHFSSでアンテナの基板と同じである。シミュレーションにおいて、線路幅の計算が非常に重要である。媒質が真空である線路の幅とインピーダンスの関係が式(6)で示している[5]。

$$Z_0 = 30 \ln \left[1 + \frac{4h}{W} \left\{ \frac{8h}{W} + \sqrt{\left(\frac{8h}{W}\right)^2 + \pi^2} \right\} \right] \quad (6)$$

ここで、 Z_0 は特性インピーダンス、 W はマイクロスト

リップ線路の幅、 h は基板の高さである。式(6)から、インピーダンスが高くなるとともに線路の幅が細くなる事が分かる。

表3 マイクロストリップの幅

インピーダンス [ohm]	マイクロストリップ線路の幅 [mm]
50	4.404
100	1.202
150	0.367
200	0.104
400	0.0006

50 Ω から 400 Ω までの各マイクロストリップ線路の幅を ADS を用いて計算した結果が表 3 で示される。また、マイクロストリップの長さを 40mm と設計した図 6 の回路を用いて、シミュレーションを行う。ADS で得られる S_{11} と S_{21} を用いて、線路の損失を式(7)を用いて計算する。

$$Loss = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (7)$$

線路のインピーダンスと線路損失の特性は図 7 に表される。200 Ω 以下の線路損失はほぼ 0 であり、200 Ω から 400 Ω まではインピーダンスが上昇するにつれて損失が激しく増加することが分かる。

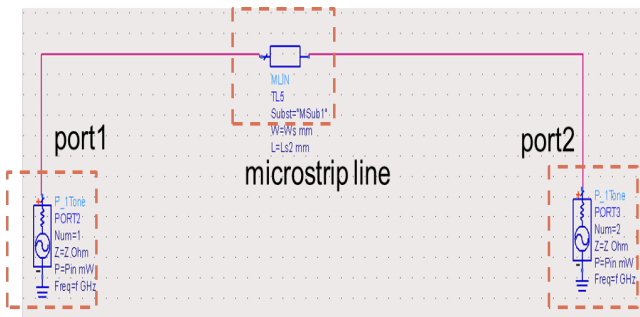


図 6 ADS での線路損失のレイアウト

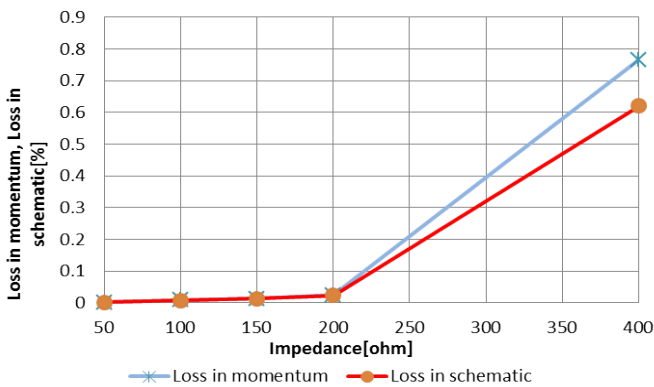


図 7 各インピーダンスの線路の損失

7. 整流回路の効率について

図 8 示す整流回路を ADS を用いてシミュレーションを行う。入力電力は 10mW、40mW、80mW の場合、線路のインピーダンスが変わることによって整流効率の特性が図 9 のように得られる。また、ダイオード損失の特性は図 10 で示している。50 Ω から 200 Ω までは線路の損失が同じ程度であるため、インピーダンスを高くすることによって整流効率が向上すると予想した。しかし、最高の整流効率は 75 Ω から 125 Ω の間であった。125 Ω より高いインピーダンスで効率が低下した原因を考えるためには、ダイオードの電流特性も考慮す

る必要がある。ダイオードに流れる電流が I_D より小さくと、ダイオードが開放状態とみなされる場合がある。 I_D は式(8)で表される。

$$I_D = I_s (e^{qV/kT} - 1) \quad (8)$$

最後に、インピーダンスを高くすることによって 75 Ω から 125 Ω の間整流効率が 50 Ω より 5% 程度の効率が向上した。

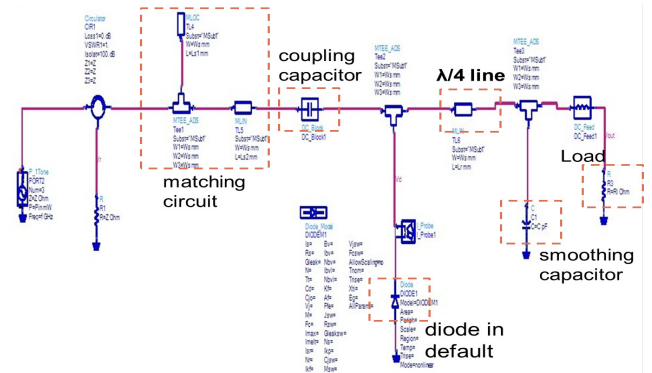


図 8 ADS での整流回路のレイアウト

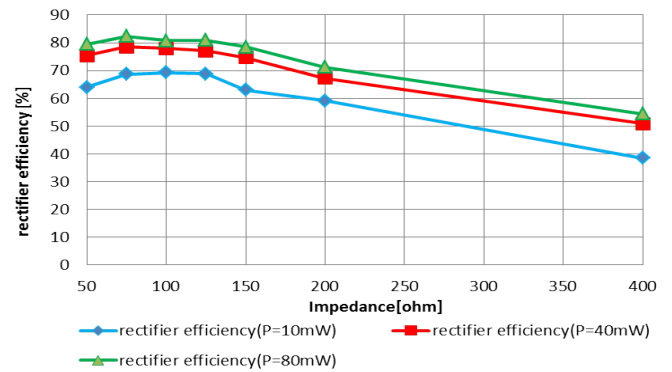


図 9 各インピーダンスの整流効率のシミュレーション結果

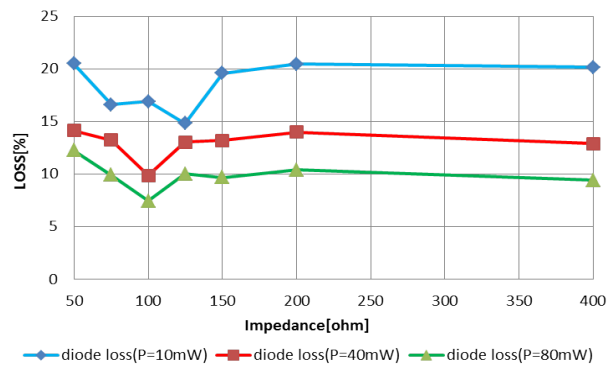


図 10 各インピーダンス整流回路におけるダイオード損失のシミュレーション結果

8. まとめ

RFID タグを受け入れる電力レベルを RCR STD-1 規格により、100mW 以下級と計算できた。また、アンテナの最大出力電力は 300mW と基準になる。

HFSS で方形パッチアンテナを設計し、インピーダンスは 50 Ω から 400 Ω までのアンテナの放射効率が得られ、ほぼ同じ程度の損失であることが分かった。

整流回路の線路のインピーダンスを変換することで、線路の損失を検討した。200 Ω 以下で線路の損失は小さく、一方で 200 Ω 以上は激しく増えることが分かった。最後に、整流回路のシミュレーションを行い、75 Ω から 125 Ω まで一番高い効率が得られた。従来の 50 Ω インピーダンスより効率が 5% 向上した。

文 献

- [1] Hitoshi Kitayoshi and Kunio Sawaya, "Development of a Passive RFID-Tag with 10-m Reading Distance under RCR STD-1 Specification," Proceeding of ISAP'04, pp. 969-972, Sendai, Japan, Aug. 2004.
- [2] “構内無線局 2.4GHz 帯移動体識別用無線設備” RCR STD-1 3.2 版, 電波産業会.
- [3] J. Q. Howell, "Microstrip antennas," in IEEE Group on Antennas and Propagation Int. Symp., Dec. 1972, pp. 177.
- [4] Nozomu Suzumu, Tomohiko Mitani and Naoki Shinohara, "Study and Development of a Microwave Power receiving System for ZigBee Device", Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference 2010.
- [5] 小西良弘, "マイクロ波技術講座・理論と実際", 日刊工業新聞社. p123.