

無電源 10m 超応答可能な無線タグ温度センサ

北吉 均[†] 澤谷 邦男[‡]

[†] 仙台地域知的クラスター 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-04

[‡] 東北大学工学部 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: [†] kitayoshi@niche.tohoku.ac.jp, [‡] sawaya@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 950MHz 帯 4W EIRP 及び 2.45GHz 帯 RCR STD-1 規格で、それぞれ 30m まで通信可能な温度センサ付きパッシブ無線タグを開発・試作している。我々は、無線タグに 2 分割マイクロストリップ 3 端子アンテナと受電部の $\lambda/4$ ショートスタブ共振回路及びラダー昇圧整流回路を用いることを提案している。まず、2 分割マイクロストリップ 3 端子アンテナを提案し、従来のダイポール型に比べて無線タグからの応答信号強度を約 10dB 強くすることができることを示している。また、このアンテナを用いることにより、従来は利用が難しかった比較的大きな容量性の可変インピーダンス素子を応答用に利用することが可能となり、無線タグの小電力化と低電圧動作を実現できることを示している。無線タグの受電部は、入力インピーダンス 50Ω で動作し、 -20dBm の RF 入力を無線タグ応答回路の動作条件である 0.6V , $2\mu\text{A}$ まで昇圧整流することができることを明らかにしている。試作された無線タグのサイズは、950MHz 帯が名刺サイズ、2.45GHz 帯が名刺の $1/4$ の面積である。

キーワード パッシブ RFID, 温度センサ, 長距離通信, マイクロストリップアンテナ, 昇圧整流器

Long Range Passive RFID-Tag for Multipoint Temperature Indication System

Hitoshi KITAYOSHI[†] and Kunio SAWAYA[‡]

[†] Intelligent Cluster in Sendai Area 6-6-04 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579 Japan

[‡] Faculty of Engineering, Tohoku University 6-6-05 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579 Japan

E-mail: [†] kitayoshi@niche.tohoku.ac.jp, [‡] sawaya@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract A novel long range passive RFID tag with 30 m reading distance under ARIB standards is proposed. The proposed tag is composed of a divided microstrip antenna and a passive voltage multiplying circuit. The received level at the reader for the case of the proposed tag is about 10 dB greater than that for the case of the dipole antenna of the conventional tag. Since the antenna is a microstrip type antenna having a ground plane, it can be used in the vicinity of a metal structure. The proposed rectifying circuit is composed of a tank circuit of a $\lambda/4$ short stub and modified 3-stage Cockcroft-Walton circuit and can convert from -20dBm ($Z_0=50\Omega$) RF input of 950 MHz or 2.45 GHz to more than 0.6V DC voltages at load current $2\mu\text{A}$ for the transponding operation. The size of fabricated tags for 950 MHz band is $90\times 60\times 4\text{mm}$ and that for 2.45 GHz band is $70\times 25\times 4\text{mm}$.

Keyword Passive RFID, Temperature sensor, Long range communication, Microstrip antenna, Multiplying rectifier

1. まえがき

近年、ユビキタス・ネットワークの実現手段として無線タグの様々な応用が報告されている。無線タグシステムは、質問器（タグリーダ）と無線タグ（RFID）によって構成される。小形パッシブ動作で、かつ各種センサ機能を有し、応答距離が 10m を超える無線タグが安価に入手可能になれば、単なるバーコードの代替としてだけでなく、これまで難しかった大規模な社会インフラストラクチャを高い自由度で構築することができ、全く新しい未来のネットワーク社会を実現できるものと考えられる。

本報告では、これまでに提案した 2 つの技術、即ち 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[1],[2]を用いて温度センサ付きパッシブ無線タグを開発・試作した結果について述べる。この無線タグは、950MHz 帯 4W EIRP[3]及び 2.45GHz 帯 RCR STD-1 規格[4]で、それぞれ 30m の距離まで応答できる。また、試作した無線タグの大きさは、950MHz 帯が名刺大、2.45GHz 帯が名刺の 1/4 の面積である。

2. タグアンテナ

図 1 にダイポールアンテナを用いた従来型のパッシブ無線タグ[5]の構成を示す。可変インピーダンス素子 Z_v は無線タグからの応答信号を返送するためにダイポールアンテナの端子 A-B 間に接続されている。また、無線タグ内の制御回路を動作させるための受電整流回路も同じ端子 A-B 間に並列接続される。このため、互いに影響しあうという欠点があった。

図 2 に提案する 2 分割マイクロストリップ 3 端子アンテナを用いたパッシブ無線タグの構成を示す。この図で可変インピーダンス素子 Z_v として利用するダイオードは、アンテナ端子 A-B 間に接続され、受電昇圧整流回路は端子 B-C 間に接続されており、互いの動作に影響しにくい構成である。また、地板を有しているために、金属等に密着して使用することができ、かつ後述するように受電昇圧整流のための $\lambda/4$ ショートスタブ共振回路を容易に一体化することができる。

図 3 に質問器での無線タグからの応答信号レベルの解析モデルを示す。ここで、 f_0 は質問器から送信する RF 信号周波数であり、 f_{LO} はダイオードに加える変調信号周波数である。 $f_0 + f_{LO}$ の周波数の応答信号は質問器アンテナで受信され、ハイブリッド回路を介して受信機に接続されるものとする。また、ダイオードとして PIN ダイオードを想定している。図 4 は、キャリア周波数 $f_0 = 2.45\text{GHz}$ とし、質問器とタグ間の距離 $z = 83\lambda_0$ ($\lambda_0 = 12.2\text{cm}$) の質問器における応答信号受信レベルを質問器からの RF 送信電力で規格化した解析結果である。ただし、数値解析はモーメント法を用いて行

った。この図では、タグアンテナの長さ L を横軸にとり、地板のない従来型のダイポールアンテナを用いた場合と地板を有する提案型マイクロストリップアンテナを用いた場合の比較をしている。両者のストリップ導体幅 $w = 0.053\lambda_0$ 。及び可変インピーダンス素子として装荷した PIN ダイオードの順方向等価直列抵抗 $R_s = 1\Omega$ 、逆方向接合容量 $C_0 = 2\text{pF}$ は共通とした。また、マイクロストリップアンテナのストリップ導体と地板間の距離 $h = 0.02\lambda_0$ とした。この図を見て分かるように、提案型マイクロストリップアンテナを用いたタグからの応答信号レベルは、従来のダイポール型と比較して、ほぼ同じアンテナ長で約 10dB 高い。これは、無線タグにおける応答信号レベルがタグアンテナの利得の 2 乗に比例すること、及び後述するように可変インピーダンス素子がアンテナの反射条件を効率良く制御できていることによるものである。

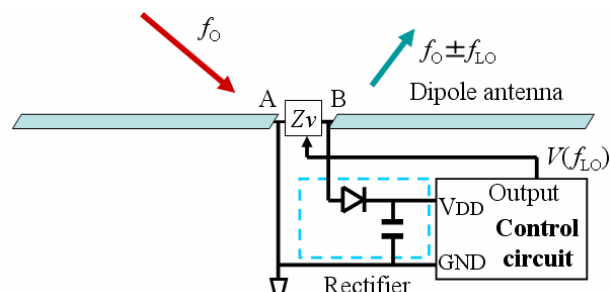


図 1 従来型パッシブ無線タグの構成

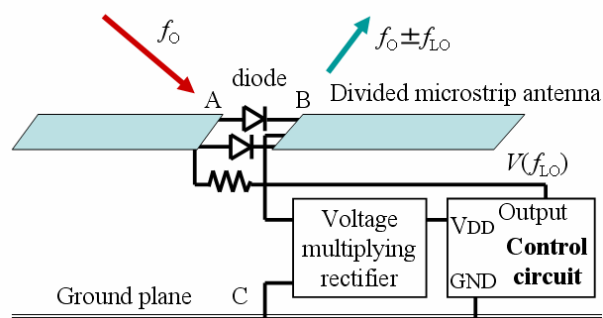


図 2 提案するパッシブ無線タグの構成

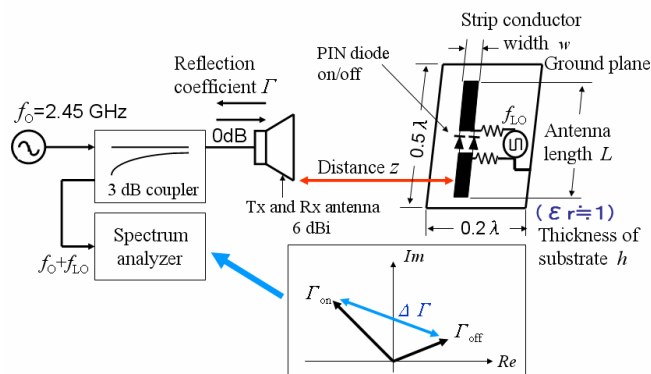


図 3 無線タグからの応答信号レベルの解析モデル

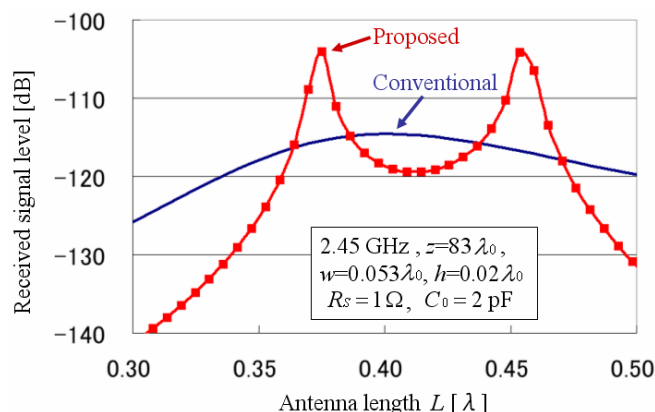


図4 無線タグからの応答信号レベルの数値解析結果

マイクロストリップアンテナは、ストリップ導体と地板間の距離 h を小さくし、導体幅 w を大きくすることで、同じアンテナ長 L で共振周波数を低くすることができる。図5は、2種類の w と h における提案方式の無線タグの応答信号レベルが装荷するPINダイオードの順方向等価直列抵抗 R_s によってどのように変化するかを解析した結果である。2分割マイクロストリップアンテナに装荷したPINダイオードの R_s を0から6Ωまで変化させ、 $C_0=1$ pFは一定とした。なお、質問器とタグ間の距離 $z=83\lambda_0$ 、タグアンテナ長 $L=0.364\lambda_0$ とした。この図を見て分かるように、共振周波数を低くした場合、装荷するPINダイオードの R_s 値が応答信号レベルに強く影響するため、より R_s 値の小さいPINダイオードを使用する必要がある。

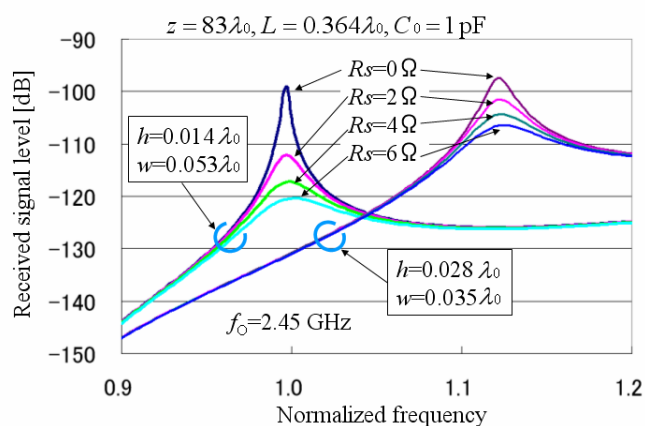


図5 提案方式の無線タグからの応答信号レベルに対するアンテナ形状の影響

図6及び図7は、それぞれ提案型及び従来型のタグアンテナに装荷するPINダイオードの R_s 及び C_0 の応答信号レベルへの影響を解析した結果である。装荷するPINダイオードのパラメータを変化することによって、応答信号レベルがピークとなる周波数が変化するので2.45GHz付近の複数の周波数で解析を行い、応答

信号レベルのピーク値を評価した。なお、質問器とタグ間の距離 $z=83\lambda_0$ 、タグアンテナ長 $L=0.364\lambda_0$ 、ストリップ導体幅 $w=0.053\lambda_0$ 、ストリップ導体と地板間の距離 $h=0.02\lambda_0$ は一定とした。これらの解析結果を見て分かるように、提案型は低い R_s で高い応答信号レベルが得られ、 C_0 値は応答信号レベルにあまり影響しない。一方、従来型では低 C_0 で高い応答信号レベルが得られるのに対して、 R_s 値は応答信号レベルにあまり影響しない。このように、提案型と従来型では装荷する可変インピーダンス素子 Z_v に要求される性能が全く異なることが分かる。

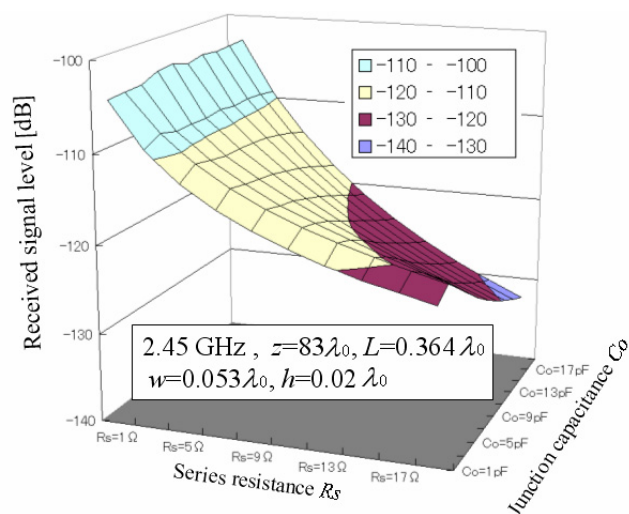


図6 提案方式の無線タグからの応答信号レベルに対する装荷PINダイオードの影響

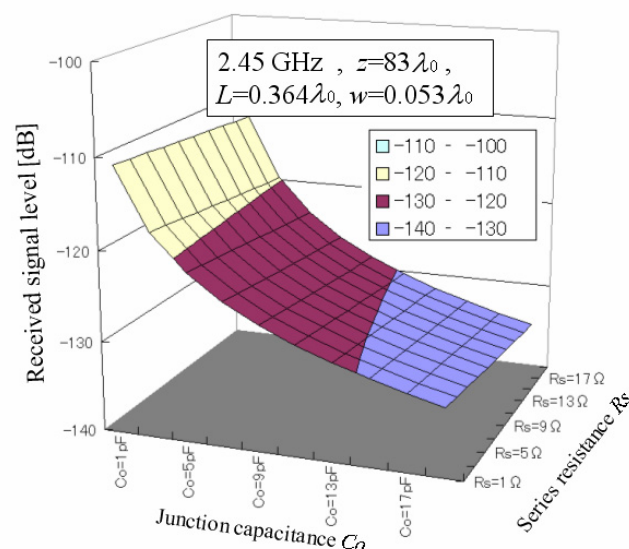


図7 従来方式の無線タグからの応答信号レベルに対する装荷PINダイオードの影響

3. 昇圧整流回路

図1に示した従来型パッシブ無線タグの受電整流

回路で、タグ内の制御回路動作に必要な DC 出力電圧を得るためには、整流回路側からみたタグアンテナの出力インピーダンスを上げなければならない。例えば、高い出力インピーダンスが得られる折り返しダイポールを利用したとしても、図 1 の基本的な整流回路を用いた場合、1V の DC 出力電圧を得るためには 0dBm 程度の RF 入力電力が必要である。図 2 に示したマイクロストリップアンテナを用いた提案型パッシブ無線タグのアンテナの出力インピーダンスは概ね $50\ \Omega$ 程度と低インピーダンスである。また、このタグで質問器とタグ間の距離 $z=10\text{m}$ とし、RCR STD-1 規格で質問器を動作させた場合に、タグでの受信 RF 電力は約 -10dBm である。この RF 信号から従来方式の整流回路で得られる DC 電圧は 0.1V 以下である。したがって、タグ内の制御回路を動作させるためには、マイクロ波帯の微弱電力で動作し、かつ 10 倍以上の昇圧比を有する整流回路が必要である。

図 8 は、提案型パッシブ無線タグのために考案した昇圧整流回路である。この回路は、 $3\lambda/4$ ショートスタブ・タンク回路と修正したコッククロフト・ウォルトン回路を組み合わせた構成である。修正したコッククロフト・ウォルトン回路は、本来のコッククロフト・ウォルトン回路[6]の初段ダイオードを取り除き、かつ接地側コンデンサに対して入力側コンデンサの容量を 1/10 程度まで小さくすることにより、ショートスタブと並列共振させて整合が取れるようにした。なお、この回路では整流用のショットキバリア・ダイオードとして HSMS-286 ($C_0=0.25\text{ pF}$) を使用した。

図 9 は、提案した昇圧整流回路において、-10dBm ($Z_0=50\ \Omega$) の RF 入力 CW 信号の周波数を 2.3GHz から 2.5GHz までステップ掃引したときの応答 DC 出力電圧を、SPICE の過渡応答解析機能を用いて計算機シミュレーションしたものである。この解析結果を見ると DC 出力電圧として約 1.15V が得られている。DC 負荷抵抗 $R_L=33\text{ k}\Omega$ であることから、DC/RF の電力変換効率は約 40% であり、従来のコッククロフト・ウォルトン回路を用いた 2.45GHz 帯の昇圧整流器[7]の変換効率 5% に比較して極めて高い値となっている。

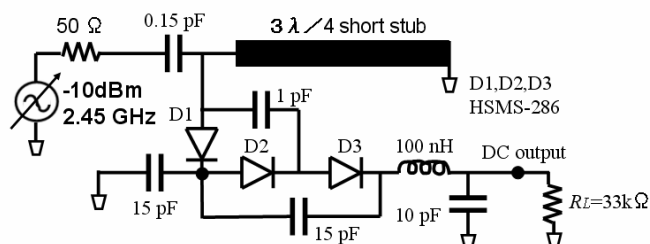


図 8 提案する無線タグ用昇圧整流回路

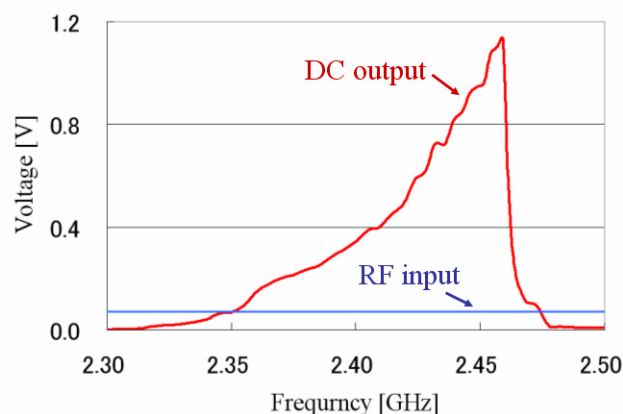


図 9 昇圧整流回路の出力電圧周波数応答の数値解析結果

4. 試作装置と実験結果

これまでに報告された長距離応答可能な主なパッシブ無線タグの動作周波数は 915MHz 又は 2.45GHz であり、ダイポールアンテナが用いられている。それぞれの応答可能な距離は、例えば、915MHz 帯で動作する従来型のコッククロフト・ウォルトン回路を用いた無線 ID タグ[7]では 9.25m、2.45GHz 帯で動作する SAW 温度センサ無線タグ[8]では 3.3m であった。本章では、UHF 帯 (860-950MHz) 及びマイクロ波帯 (2.4-2.5GHz) で動作し、それぞれ 30m まで応答可能な温度センサ付きパッシブ無線タグの試作・評価結果について述べる。

図 10 に試作した 2.45GHz 帯パッシブ無線タグの回路構成を示す。このタグでは、2 分割マイクロストリップアンテナに装荷する可変インピーダンス素子としてバラクタ・ダイオードを採用した。これは、2 章で述べたように 2 分割マイクロストリップアンテナに装荷する可変インピーダンス素子で強い応答信号を返送するための条件は等価直列抵抗 R_s が小さいことである。すなわち、接合容量の大きい低電圧で動作するバラクタ・ダイオードを用いることによって動作電圧の低電圧化と消費電流の低減を図った。図 10 に示す回路構成では DC 動作電圧 0.5V 以上、消費電流 $1\ \mu\text{A}$ 以上で無線タグの温度情報返送動作が可能となった。また、この回路構成で昇圧整流部のショートスタブ長は $\lambda/4$ とした。これは、2.45GHz 帯無線タグでは質問器からの送信キャリア信号として広帯域 FHSS を用いるために、共振回路の Q 値を下げる必要があることによるものである。この昇圧整流回路の -20dBm ($Z_0=50\ \Omega$) RF 入力における DC 出力は 0.6V、 $2\ \mu\text{A}$ であった。

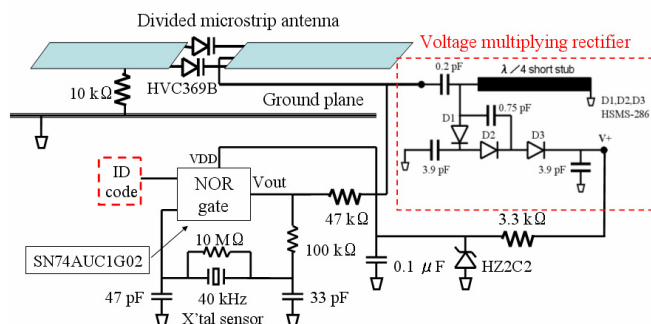


図 10 試作した無線タグの回路構成

図 1 1 及び図 1 2 にそれぞれ開発試作した 2.45GHz マイクロ波帯、及び 860-950MHz の UHF 帯で利用できる温度センサ付きパッシブ無線タグの写真を示す。これらの無線タグで用いられているマイクロストリップアンテナの動作利得はともに約 5dBi であり、マイクロ波帯 RCR STD-1 仕様[4]及び UHF 帯 4W EIRP 仕様[3]で動作させたとき、質問器から 30m 離れた位置で無線タグの受信電力はともに約 -20dBm である。

図 1 3 は図 1 2 に示す UHF 帯温度センサ付きパッシブ無線タグの温度情報返送動作時における受電 DC 出力電圧のキャリア周波数特性である。ただし、質問器の出力は 0.25W EIRP、質問器とタグ間の距離は $z=3\text{m}$ である。マイクロストリップアンテナ及び昇圧動作のための $\lambda/4$ ショートスタブを用いた共振回路はともに狭帯域動作であるにもかかわらず、両者を併せたレクテナ動作は互いに補完しあう形で動作比帯域幅 10% 以上を実現しており、UHF 帯では日本規格だけでなく欧米規格での利用も可能である。

2.45GHz 帯温度センサ付きパッシブ無線タグを2個用いた温度測定実験装置の構成を図14に示す。また、室内実験の様子を図15に示す。この実験では、室内の限られた狭い場所であることから、質問器からの送信 EIRP 値は RCR STD-1 仕様の 1/50 とした。また、質問器側の送受信アンテナにはそれぞれ 7.5dBi のダブルリジッドガイドアンテナを用い、タグからの応答信号をスペクトラムアナライザで観測した。質問器の送信出力電力は 0.1W であり、EIRP は 0.56W である。2つのタグと質問器アンテナ間の距離はそれぞれ 3m と 3.5m とした。これは RCR STD-1 仕様動作でそれぞれ 22m と 26m に相当する。試作したタグはそれぞれ ID ごとに温度を異なるサブキャリア周波数に変換して返送する仕組みになっており、2つのタグの温度を連続して同時に計測することができる。図16は、スペクトラムアナライザによって観測された2つのタグからの応答信号の周波数スペクトラムである。2つのタグの温度をそれぞれ、(27℃, 27℃), (44℃, 27℃) 及び (44℃, 53℃) に変えたときに観測されたスペクトラ

ムを重ねてプロットしており、約 1Hz/°C の周波数変化として各タグの温度が測定されていることがわかる。なお、このタグでの温度測定範囲及び測定精度は -40°C ~ +85°C 及び 0.3°C である。また、この実験装置では質問キャリア周波数とスペクトラムアナライザの解析周波数基準は 10MHz の共通クロック信号によって PLL 位相ロックされており、無線タグ温度センサの X'tal 発振周波数を ±0.1Hz の精度で遠隔測定することができる。

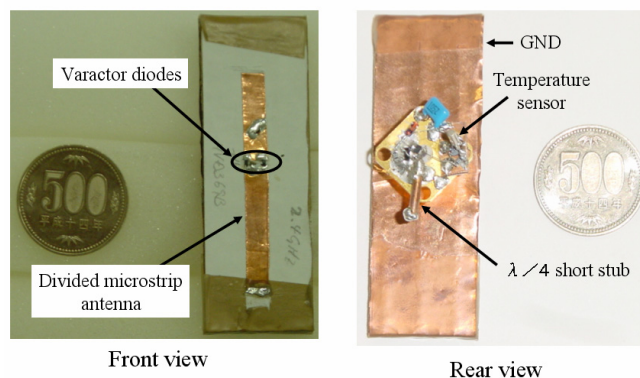


図 1 1 2.45GHz 帯パッシブ無線タグの試作品

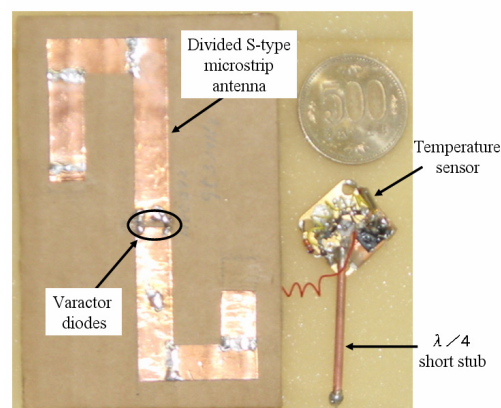


図 1 2 860-950MHz 帯パッシブ無線タグの試作品

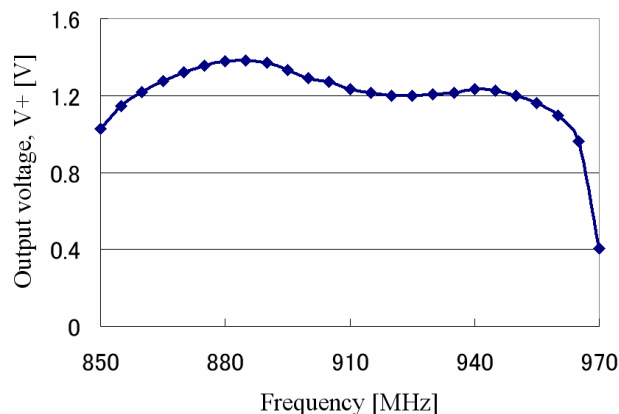


図 13 試作した UHF 帯パッシブ無線タグの受電電源 DC 電圧のキャリア周波数特性

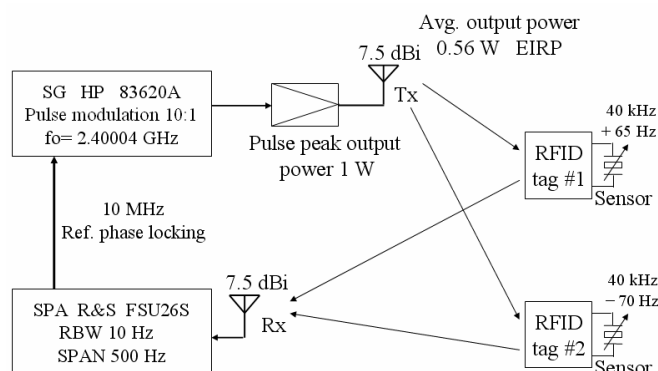


図 1 4 2.45GHz 帯無線タグの応答実験装置の構成

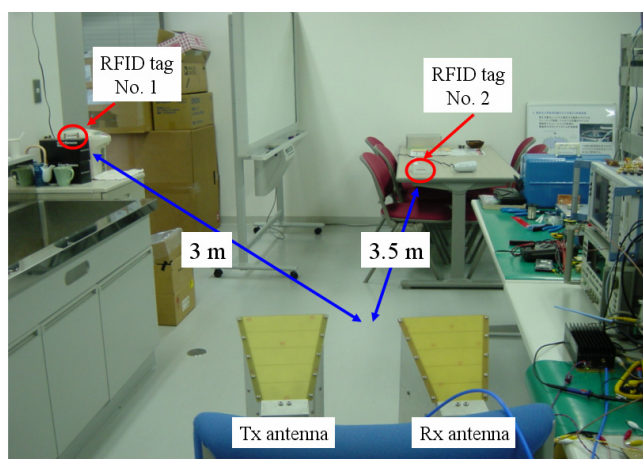


図 1 5 2.45GHz 帯温度センサ無線タグの室内での
応答実験の写真

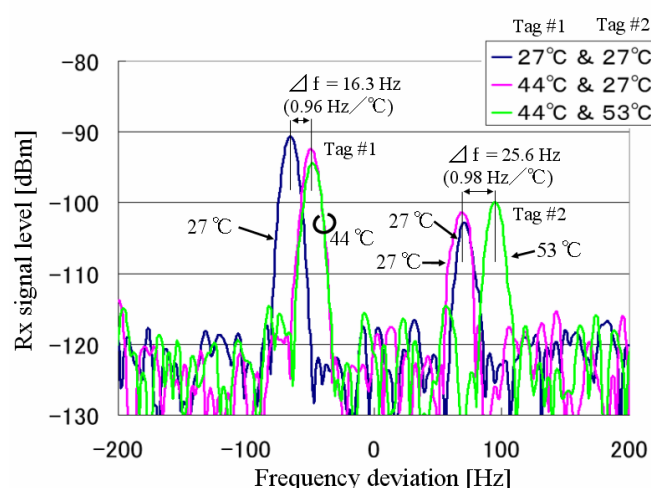


図 1 6 2.45GHz 帯無線タグによる温度測定の実験
結果

5. むすび

無線タグの送受信に用いる 2 分割マイクロストリップ 3 端アンテナ及び質問器から送信された RF 電力をタグ内制御回路動作のための DC 電圧に変換する昇圧整流回路を提案した. 2 分割マイクロストリップ 3 端子アンテナは, 従来のダイポール型と比較して無線タグからの応答信号強度が約 10dB 高くなることを示した. また, ショートスタブ・タンク回路と整合させた修正コッククロフト・ウォルトン回路を考案し, 従来に無い高い効率で昇圧整流動作することを明らかにした. さらに, タグアンテナに装荷する応答キャリア変調用の可変インピーダンス素子に要求される性能が従来ダイポール型と全く異なることを計算機シミュレーションによって明らかにし, 無線タグ内の制御回路動作電圧の低電圧化と消費電力の低減を可能にした.

これらの技術を用いて, マイクロ波帯及び UHF 帯でそれぞれ 30m 応答可能な温度センサ付きパッシブ無線タグを開発し, 試作と実験を行った. UHF 帯は名刺サイズであり, マイクロ波帯は名刺の 1/4 の面積である. 試作したタグの温度測定使用範囲は, 電池を持たないために -40°C ~ +85°C と広く, かつ温度測定精度は 0.3°C であった. これらの検討により, 従来のパッシブ無線タグに比べて大幅に長い応答距離が達成できることを示した.

文 献

- [1] 北吉, 澤谷, “RCR STD-1 仕様で無電源 10m 応答可能な RFID タグ用アンテナの検討,” 信学 '04 総大, B-1-50, Mar. 2004.
- [2] H. Kitayoshi, K. Sawaya, “Development of a Passive RFID-Tag with 10-m Reading Distance under RCR STD-1 Specification,” Proceedings of ISAP'04, pp. 969-972, Sendai, Aug. 2004.
- [3] 総務省ホームページ, “情報通信審議会・情報通信技術分科会・小電力システム委員会・報告案,” http://www.soumu.go.jp/s-news/2004/pdf/041112_3a.pdf.
- [4] ARIB Standard, “構内無線局移動体識別用無線設備,” RCR STD-1, 3.0 版, July 2003.
- [5] Raj Bridgelall, “Bluetooth/802.11 Protocol Adaptation for RFID Tags,” Proceedings of European Wireless 2002, Feb. 2002.
- [6] “Cockcroft-Walton Voltage Multipliers,” e.g; <http://www.wenzel.com/pdf/voltmult.pdf> and <http://deutsche.nature.com/physics/16.pdf>.
- [7] Udo Karthaus and Martin Fischer, “Fully Integrated Passive UHF RFID Transponder IC With 16.7-μW Minimum RF Input Power,” IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 38, no. 10, pp.1602-1608, Oct. 2003.
- [8] G. Scholl, C. Korden, E. Riha, C.C.W. Ruppel, U. Wolff, G. Riha, L. Reindl, R. Weigel, “SAW-Based Radio Sensor Systems,” IEEE Microwave Magazine, vol. 4, no. 4, pp. 68-76, Dec. 2003.