

アクティブ型 RFID リーダの低消費電力化技術

移動端末にアクティブ型 RFID リーダを搭載するために必要なリーダの低消費電力化に向けて、考案した2つの技術とその効果について解説する。

おおくぼ しんぞう たきいし こうせい
大久保 信三 瀧石 浩生

1. まえがき

モバイルユビキタス[1]は、あらゆるモノやコンピュータがネットワーク経由あるいは直接情報をやり取りすることで、新たなタイプのサービスが期待されている。このような中で、さまざまなモノも含めたコネクティビティを提供するシステムの実現技術の1つとして、RFID（Radio Frequency IDentification）が近年注目を集めている。

RFIDは、IDを送信する無線タグとそのIDを読み取るリーダから構成され、モノにタグを貼付することで、主に商品識別・管理を行う技術として展開されてきた。RFIDを大別すると、リーダから送出される電力供給によりタグがIDを送信するパッシブ型と、タグが電池を持ち自らIDを送信するアクティブ型の2種類がある。

アクティブ型はタグに電池を搭載するため、電池容量、アンテナ径に制約を受けるハンディ型リーダでも、パッシブ型より長い通信距離が得られることが特徴である。この通信距離の違いにより、サービス性も以下のように特徴づけられる。

通信距離が短いパッシブ型では、ユーザはリーダをタグにかざすという自発的な行為によりIDを取得できる。つまり、サービスを楽しむためには、ユーザの意識が必要となる。一方、アクティブ型には数メートル程度の通信距離があるため、リーダを保持したユーザはタグに近づくだけでIDを取得することが可能となる。つまり、アクティブ型のサービス享受には、必ずしもユーザの意識を必要としない。したがってアクティブ型は、ユーザが無意識のうちに

行動をサポートしたり、リーダがIDを受信することでユーザに「気づき」を与えたりするようなサービスを実現することができる(図1)。

ところで、リーダを設置してタグをユーザが持つ形態であれば通信距離の制約は緩和されるものの、設置したリーダで取得したIDをユーザにフィードバックするネットワー

クを新設する必要があり、サービスの展開は狭くなると考えられる。このため、リーダをユーザが持つ形態が必須であり、移動端末にリーダ機能を搭載できれば、さらに利便性は向上する。

アクティブ型RFIDリーダを搭載した移動端末のサービスの一例を図2に示す。図2(a)の監視系サービスとは、リ

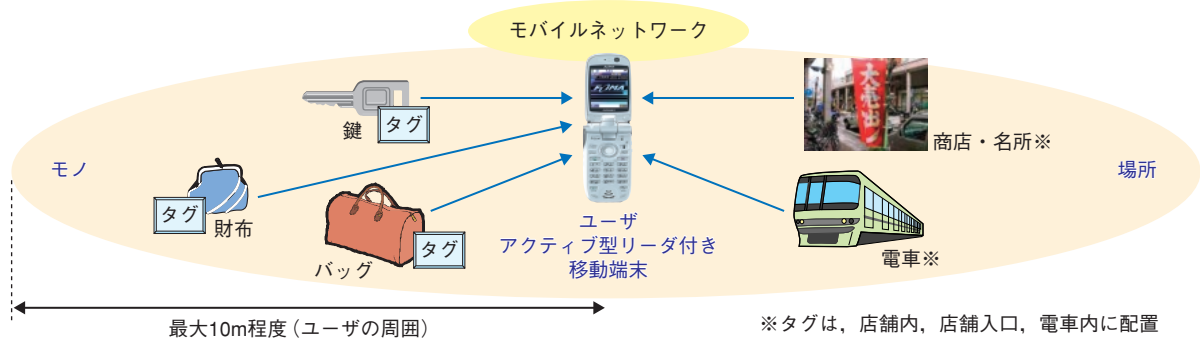


図1 アクティブ型RFIDリーダ付き移動端末

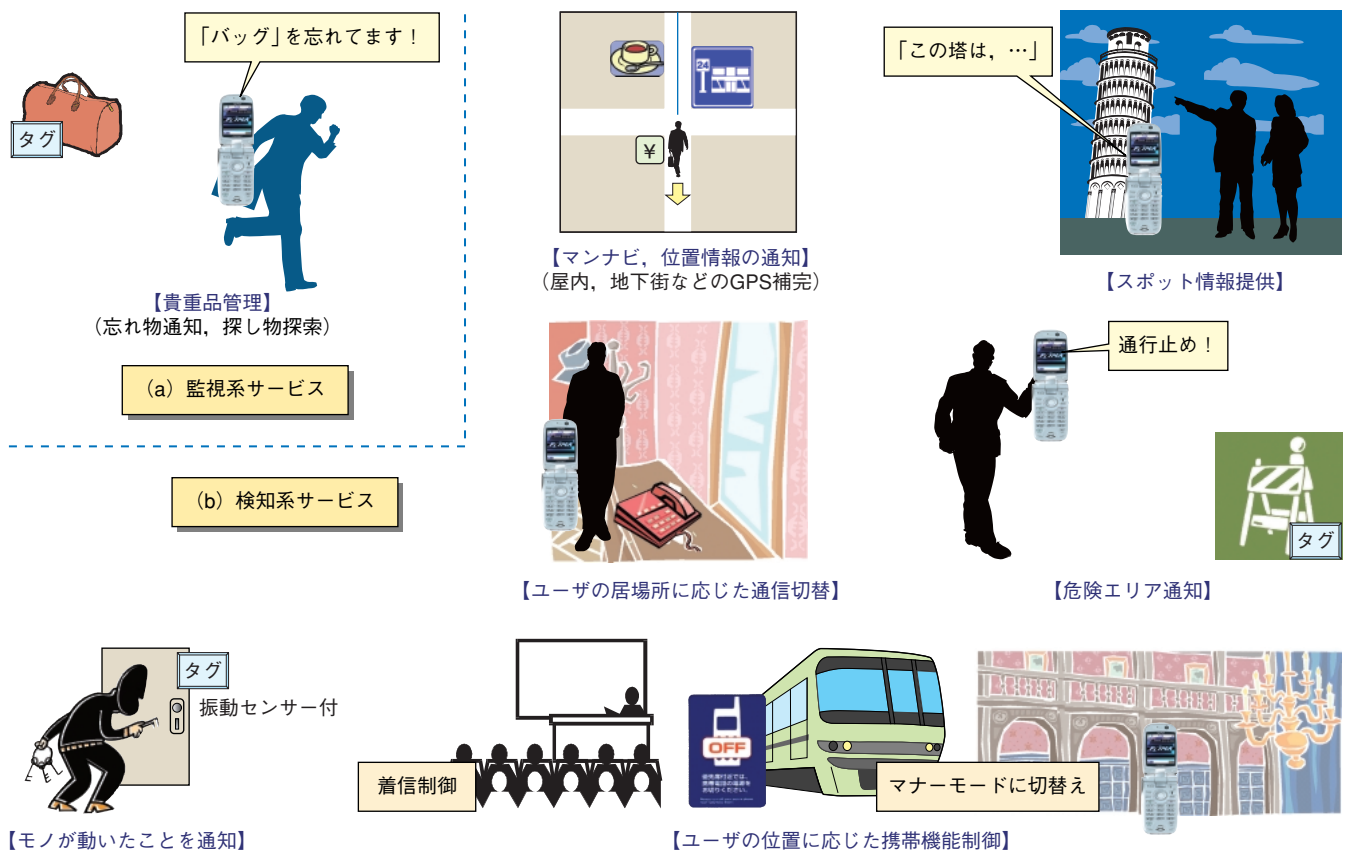


図2 サービスの例

ーダがIDをモニタリングし続けることが必要なサービスであり、図2(b)の検知系サービスとは、リーダがIDを検知することが必要なサービスである。

現在、市販のアクティブ型RFIDリーダは、仮にチップ化したとしても消費電力の面で移動端末に搭載するのは困難と考えられ、低消費電力化に向けた新技術が必要である。

本稿では、アクティブ型RFIDリーダを移動端末に搭載することを目指し、リーダの低消費電力化に向けた考案技術について述べる。

2. リーダの低消費電力化技術

考案したTH (TimeHopping)^{*1}アクセス・間欠受信制御法とアンダーサンプリング^{*2}適用マルチゼロクロス検波の2つの低消費電力化技術について以下に説明する。

2.1 THアクセス・間欠受信制御法

監視系サービスでは、タグからIDが送信されるタイミングでのみ受信動作を実行する間欠受信制御により低消費電力を実現できる。間欠受信を行うには、周期的にIDを送信する方法があるが、この場合、複数のタグからの信号が連続することにより衝突が発生し、リーダでは連続して受信不可となりやすい。そこで、連続した受信不可の頻度を低減することが重要である。

本技術は、IDからTH系列を生成し、このTH系列に基づいて、タグでは送信タイミングをランダム化することにより連続衝突率を低減し、リーダでは間欠受信を実行する、というアクセス・間欠受信制御法である。

ここで、TH系列の生成原理を説明する。一例として、TH系列の周期が7の場合のTH系列生成を図3に示す。IDのLSB (Least Significant Bit)^{*3}側から3bitずつ順次選択して2つのブロック(k_1, k_2)とする。各ブロックに対応するガロア体^{*4} $GF(2^3)$ の各元にそれぞれ変換し、これを係数とする式(1)を求める。 $\hat{k}_1, \hat{k}_2$ は、 k_1, k_2 に対応する元のべき表現での指数を表す。

$$P_{(x)} = x^2 + \alpha^{\hat{k}_1} x + \alpha^{\hat{k}_2} \quad (1)$$

式(1)の x に順次、 $GF(2^3)$ の元 $\{1, \alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^6\}$ を代入し、べき指数が同一の項の加算はゼロ (例えば、 $\alpha^2 + \alpha^2 = 0, 1 +$

$1 = 0$) という規則を考慮して計算した結果に基づいた値をTH系列 $\{S_j\}$ とした。

タグのTH送信、リーダの受信動作の例を図4に示す。タグは、生成したTH系列の値 S_j を送信すべきスロット番号として、IDとTH系列の位相情報 j を送信する。一方、リーダは、モニタリングにより初めのIDが受信されるまで、連続受信を行う。そして、受信したIDからタグと同様にTH系列を生成し、さらに位相情報から以降のID受信タイミングを推定する[2]。このようにして、推定した受信タイミングでのみ受信する間欠受信を行う。

同時に検知系サービスも享受する場合、リーダは、断続的に検知系サービスのIDを受信するための連続受信を実施する。検知系サービスのタグと監視系サービスのタグの送信周波数は、それぞれ異なる。

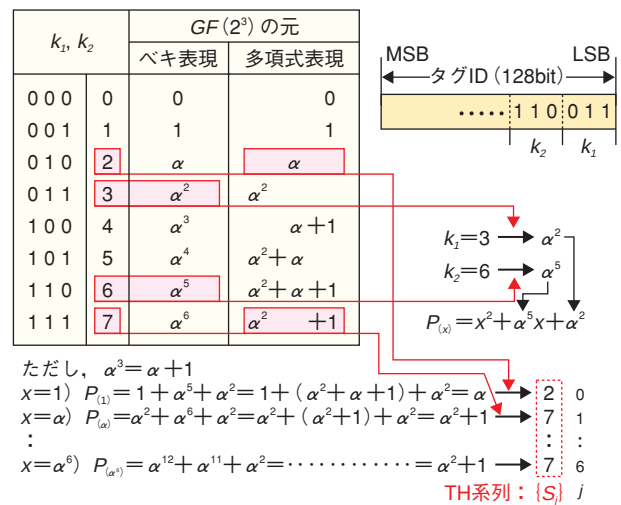


図3 TH系列生成の例 (周期が7の場合)

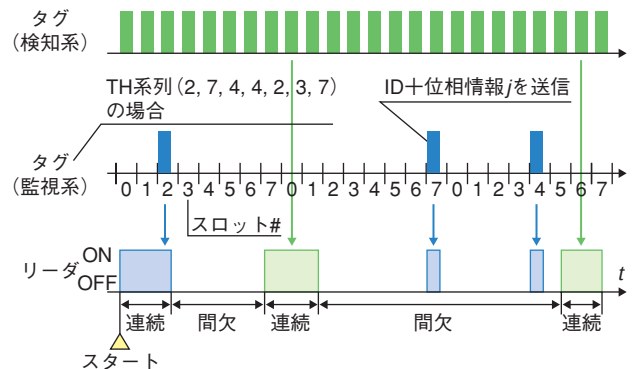


図4 タグのTH送信、リーダの受信動作の例

*1 TH: 符号系列で決定されるパターンに基づいて信号の送信タイミングを変化させる方式。
 *2 アンダーサンプリング: 高周波数帯の信号を低い周波数帯に変換する方法に用いられ、搬送波周波数よりも低く、かつ伝送信号の片側帯域幅の2倍以上の周波数で行うサンプリング。
 *3 LSB: 最下位ビット、最上位ビットは、MSB (Most Significant Bit)。

*4 ガロア体: 整数を素数 (例えば5) で除算した余りの集合 $\{0, 1, 2, 3, 4\}$ のように、要素が有限で四則演算結果が閉じている集合。符号理論などで一般的に用いられる。

2.2 アンダーサンプリング適用 マルチゼロクロス検波

本技術は、周波数ズレによる受信品質劣化を改善するとともに、低消費電力化に向けて受信機構成の簡易化およびデジタル化を可能としたマルチゼロクロス検波器である。ゼロクロス検波器とは、搬送波周波数帯に変換する前の周波数偏位変調 (FSK: Frequency Shift Keying)^{*5} 信号が I/Q (In-phase/Quadrature-phase)^{*6} 軸をクロスするときの方向を検出、つまり I および Q 信号のレベル変化の向き (High から Low/Low から High) とそのときのレベル (High/Low) を検出することで、タグから送信された 2 値シンボル^{*7} を判定する検波器である (図 5)。しかし、周波数ズレが大きくなると、1 シンボル区間内の FSK 信号の $\pi/2$ [rad] 以上の位相遷移がなくなる。したがって、I/Q 軸のクロスが消失 (ゼロクロス消失) するためシンボル検出ができなくなり、シンボル誤りが増大する。そこで、角度がそれぞれ異なる複数の I/Q 軸を設けるマルチ化により、ゼロクロス消失の機会を軽減するのが、マルチゼロクロス検波器である。周波数ズレは、SAW (Surface Acoustic Wave) レゾネータ^{*8}を用いた発信方式の周波数精度が低いため発生する。しかし、SAW レゾネータは、現在市販のタグや微弱無線モジュールに多く利用されており、タグの小型化・低価格化のためには必要である。

本技術を適用したマルチ数が2の場合の受信機の構成を

図5に示す。IF (Intermediate Frequency)^{*9}帯に周波数変換した受信信号を、BPF (Band Pass Filter)^{*10}を介してリミッタに入力する。一般にアクティブ型RFIDの搬送波周波数は300MHz帯であり、この周波数帯にて所要の帯域幅(式(2))を有する小型なBPFを実現するのは困難なため、IF帯に変換する。そして、リミッタで2値に変換したFSK信号を異なる複数のタイミングでアンダーサンプリングすることで、マルチゼロクロス検波を実現する[3]。この構成により、IF帯にて2値信号に変換できるので、従来構成[4][5]とは異なり、IF帯以降を自動利得制御 (AGC: Automatic Gain Control)^{*11}、アナログデジタル変換器を不要とするデジタル構成にでき、低消費電力化が可能となる。

ここで、アンダーサンプリングによる受信信号以外の不要周波数成分のエイリアシング^{*12}を発生させないために、サンプリング周波数 f は、式(2)を満足させる必要がある。

$$f_c = f_{IE}/N > BW \quad (2)$$

ここで、 f_F はIF帯の中心周波数、 N は分周比^{*13}で1以上の整数、 BW はBPFの帯域幅である。また、サンプリングの時間差 τ は、マルチ数を M とすると式(3)となる。

$$\tau = 1/4Mf_{IF} \quad (3)$$

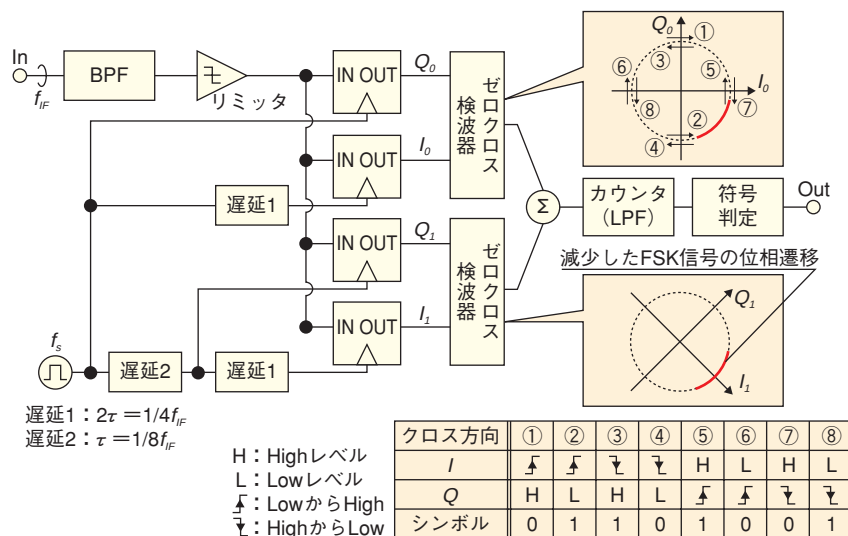


図5 受信機の構成（検波部およびその周辺）

- *5 周波数偏位変調：デジタル信号を異なる周波数（異なる位相遷移の速度）に対応づけて伝送するデジタル変調方式。
- *6 I/Q：複素デジタル信号の同相（In-phase）および直交（Quadrature）成分。
- *7 シンボル：本稿では、伝送するデータの最小単位で、1シンボルはnビット（nは自然数）から構成される。

* 8 SAW レゾネータ：無線機器の高周波部品として組み込まれている無線モジュールの発振回路方式の1つ。発振回路方式には、主に水晶式とSAW レゾネータ式があり、SAW レゾネータ式は水晶式に比べ周波数安定度が多少劣るが低コストのため使用されている。

3. 移動端末外付けRFIDの試作

試作したアクティブ型RFIDリーダの外観を写真1に、基本仕様を表1に示す。試作RFIDリーダは、考案した低消費電力化技術の効果を評価するだけでなく、図2のようなサービスが実体験できるように、移動端末（N902i）に外付け可能な形状およびインタフェースを備えている。また、アンテナはリーダの基板上に配置した誘電体チップアンテナ^{*14}である。

4. 効果

考案した2つの技術について、試作したRFIDで評価した効果を示す。

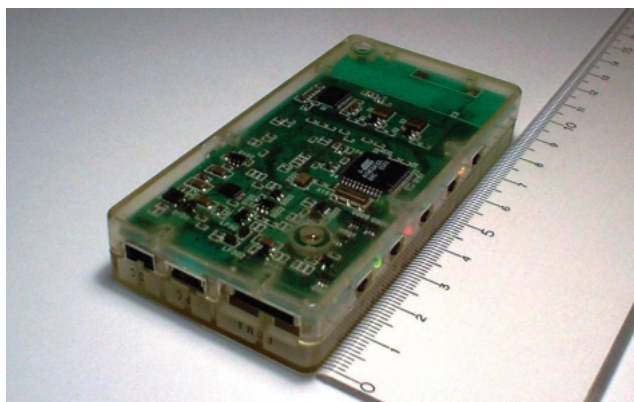


写真1 試作RFIDリーダの外観

表1 試作RFIDリーダの基本仕様

周波数	314MHz, 315MHzの2チャンネル
送信電力	微弱（電波法第4条第1号）
通信速度	9.9kbit/s, 99kbit/sの選択
到達距離	最大で10m程度（9.9kbit/s時）
変調／復調	2値FSK／非同期検波（2.2節）
符号形式	NRZ
ID	128bit
送信パケット構成	ID十位相情報（3bit）＋CRC（16bit）にFECを適用 パケット長：26.7ms（9.9kbit/s時）
大きさ・重さ	45×89×16mm, 45g

CRC（Cyclic Redundancy Check）：データの伝送中に生じる誤りの検出が可能な誤り検出方式。

FEC（Forward Error Correction）：送信側にて冗長な情報を付加し、受信側ではこれを用いて、データの伝送中に生じる誤りを訂正する方式。

4.1 THアクセス・間欠受信制御法

リーダの電池の電圧変動特性を図6に、IDの連続衝突発生率を表2に示す。タグは平均送信間隔を1秒、TH系列の周期を7とし、9.9kbit/sの通信速度でIDを送信する設定である。衝突頻度が評価項目なので、より送信パケット長が長い9.9kbit/sの通信速度としている。9.9kbit/sは、IDの到達距離を10m程度に長くしたいサービスに適用する。

(1) 消費電力の低減効果

図6より考案技術適用時の電池寿命は、タグ数に応じて連続受信よりも延長できることが分かる。連続受信では、タグ数にかかわらず9時間程度しか電池が持続しないが、考案技術の適用により、タグが1台で約30時間弱、5台で約21時間、10台で約16時間、20台で約12.5時間となる[6]。本試作は、FPGA（Field Programmable Gate Array）^{*15}を用いているので、待ち受け時もパケット受信時の25%程度の電力を消費するためこのような結果となっているが、チップ化により待ち受け時の消費電力を削減できるので、さらなる効果が期待できると考えられる。

(2) 連続衝突率の低減効果

表2は、リーダが監視系サービスのIDの連続受信から間欠受信に遷移した時点（図4）から30秒間の測定を100回試行し、1回の試行において一度もIDを受信できない

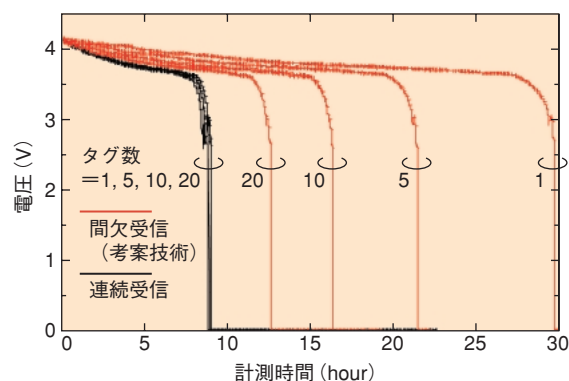


図6 試作RFIDリーダの電池の電圧変動特性

表2 タグIDの連続衝突発生率（%）

タグ数（台）	5	10	20
TH送信（考案技術）	測定内で発生なし	0.2	1.65
周期送信（従来）	9.8	18.9	40.2

* 9 IF：複数の周波数チャンネルの信号を検波するときに変換する周波数。搬送波周波数帯よりも低くすることで、所要帯域のフィルタが容易に製作できるので、必要な信号のみ選択して抽出できるなどの利点がある。

* 10 BPF：特定の周波数帯域を通過させるフィルタ。

* 11 自動利得制御：出力信号の振幅が一定となるように増幅度を自動調整する機能。

* 12 エイリアシング：伝送信号の片側帯域幅の2倍よりも低い周波数でサンプリングする場合、サンプリングした信号の一部に元の信号の周波数成分の一部が混在する歪み。

* 13 分周比：クロック周波数などを整数分の1の周波数に変換するときの比率。

状態を連続衝突と定義し、各タグについて求めた連続衝突率の平均値である。タグ間の送信開始タイミング差が重要なので、試行ごとにタイミングを変化させている。また、各タグからの受信電力は、熱雑音に起因する受信できない状態を無視できる程度大きい。考案技術の適用により、連続した衝突発生頻度を低減できることが分かる。周期送信では、30秒間で一度もIDを受信できない確率が、タグ数が5台で約10%、10台で約20%、20台で約40%であるのに対して、考案技術では、5台では100回の試行では発生せず、10台で約0.2%、20台で約2%に低減できる。

4.2 アンダーサンプリング適用 マルチゼロクロス検波

構成の簡易化およびデジタル化による消費電力の低減量の定量的評価は、チップ化により明確となる。本節では、発生し得る周波数ズレに対する耐性向上の効果を示す。

周波数ズレに対する所要受信電力特性を図7に示す。通信速度は、9.9kbit/sよりも周波数ズレに弱い99kbit/sとしている。所要受信電力とは、ID受信不可率を 10^{-2} にするために必要な受信アンテナ出力端での受信電力である。マルチ数 M の増加に従い、周波数ズレに対する耐性が向上することが分かる。マルチ数2の場合でも、周波数ズレがないときの所要受信電力 -108.4dBm に対して、想定される $\pm 100\text{ppm}$ (parts per million) (315MHzで、 $\pm 31.5\text{kHz}$)の周波数ズレでは、 -106.2dBm と所要受信電力の増大を2dB程度に抑えられる。

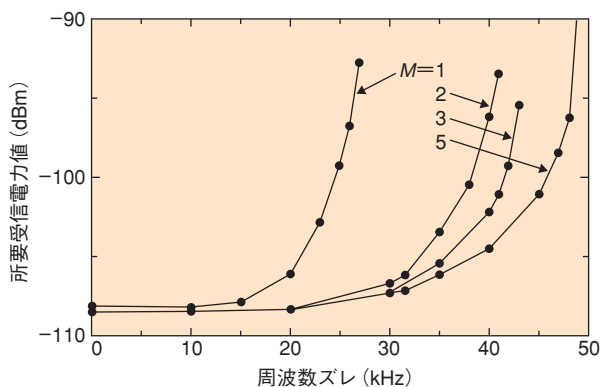


図7 周波数ズレに対する所要受信電力特性

また、本検波法ではIF帯にてサンプリングを行うので、パターン効果^{*16}を回避できIDのビットパタンの影響を受けない均一な受信品質を実現できる。

1, 0が交互に繰り返されるID (以下, ID_A) と、128bit 内すべてが同一シンボルとなるID (以下, ID_B) のID受信不可率特性を図8に示す。通信速度は、同様に99kbit/sである。ID_Aの周波数成分は1, 0が交互に繰り返される周波数付近に集中し、ID_Bの周波数成分は同一のシンボルが連続し、電圧の変化がないので0Hz付近に集中する。よって、ID_Aの高周波成分は、ID_Bよりも大きい。したがって、ID_AのLPF (Low Pass Filter)^{*17}通過電力がID_Bよりも小さくなるため、ID_AとID_Bとの受信品質の差が発生していると考えられる。しかしながら、検波後LPFの調整により、さらに差を小さくできると考えられる。以上より、マンチェスタ符号^{*18}などを行わなくても本検波器の適用により、NRZ (Non Return to Zero)^{*19}でも均一な受信品質を得られる。NRZなので、タグのSAWレゾネータの周波数偏位を不要に大きくせずに済み、実現可能な周波数偏位をすべてIDの送信に割り当てることができる。マンチェスタ符号時の位相遷移量をNRZと同じとした場合、NRZでの通信速度は、マンチェスタ符号と比べて2倍にできるので、ID送信の時間が半分にになり、衝突率の低減、電池寿命の増大につながる。

5. あとがき

本稿では、アクティブ型RFIDリーダを移動端末に搭載するために必要な低消費電力化に向けての考案技術につい

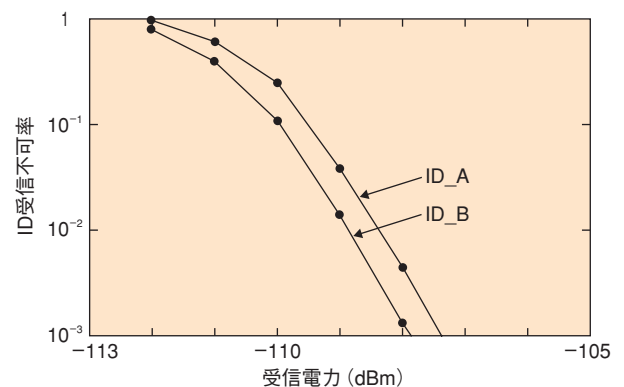


図8 ID受信不可率特性

*14 チップアンテナ：アンテナの種類の1つで、直方体かつ平坦な形のアンテナを指す。小型・軽量化に適しているため、移動端末に多く利用されている。

*15 FPGA：アレイ状に並んだセルと配線要素子で構成されている書換え可能な大規模集積回路。

*16 パターン効果：直流が遮断されている伝送系において、同一シンボルの連

続時にレベルが変動すること、レベル変動が生じるとビット誤り率は増大する。

*17 LPF：低い周波数帯域を通過させるフィルタ。

*18 マンチェスタ符号：「0」の伝送は、HighからLowへのレベル変化、「1」の伝送は、LowからHighへのレベル変化でシンボルを伝送する方法。NRZと比較して2倍の帯域を必要とする。

て述べた。試作RFIDリーダの評価結果より、受信品質を劣化させることなく、低消費電力化が行える見通しが得られた。監視系サービスでは、間欠受信を適用することでさらに低消費電力化が可能となる。本技術を適用したチップ化により、移動端末の電池寿命を大きく短縮させることなく搭載可能になると考えられる。

文 献

- [1] 今井, ほか: “4G インフラ研究の新たな方向—ユビキタス世界への広がり—,” 本誌, Vol. 12, No. 3, pp. 6-16, Oct. 2004.
- [2] 瀧石 浩生, 大久保 信三, 須田 博人: “Time Hoppingを適用したランダムアクセス制御・間欠受信制御法,” 信学ソ大, B-5-204, 2003.
- [3] 大久保 信三, 須田 博人: “アンダーサンプリングを適用したマルチゼロクロス検波法,” 信学総大, B-5-205, 2004.
- [4] E. K. B. Lee and H. M. Kwon: “NEW BASEBAND ZERO-CROSSING DEMODULATOR FOR WIRELESS COMMUNICATIONS, PART-I: PERFORMANCE UNDER STATIC CHANNEL,” Proc. of IEEE MILCOM, pp. 543-547, 1995.
- [5] S. Samadian, R. Hayashi and A. A. Abidi: “Demodulators for a Zero-IF Bluetooth Receiver,” IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 38, No. 8, pp. 1393-1396, 2003.
- [6] 瀧石 浩生, 大久保 信三, 杉山 隆利, 梅田 成視: “Time Hoppingを適用したランダムアクセス制御・間欠受信制御法による消費電力低減効果の実験評価,” 信学ソ大, B-5-101, 2005.

* 19 NRZ: 「0」の伝送はLow, 「1」の伝送はHighのように, 1シンボルの全区间において, 伝送するシンボルに対応する電圧値でパルスを送信する方法.