

超多重RFIDシステムの高位モデル化とバックエンド設計への応用

福水 洋平[†] 永田 真^{††} 瀧 和男^{†††}

[†] 神戸大学大学院自然科学研究科
^{††} 神戸大学工学部情報知能工学科
^{†††} エイ・アイ・エル株式会社

E-mail: †fukumizu@cs26.scitec.kobe-u.ac.jp, ††nagata@cs.kobe-u.ac.jp, †††taki@ailabo.co.jp

あらまし 超多重RFIDシステムは、数千個のトランスポンダと単一のリーダ間の通信をTH-CDMAに基づくアンチコリジョン技術により多重化することで同時識別性能を向上したRFID技術である。本稿ではソフトウェアシミュレータを用いた高位モデル化手法によるRFIDシステムのバックエンド設計について報告する。多重RFIDシステムの1,000を超える通信チャネルのロバスト性を外乱から受ける影響に対して分析するためのソフトウェア・シミュレータを新たに構築し、アンチコリジョン性能を左右するデジタルバックエンドの設計パラメータを調査した。最後に、分析を通して求められたパラメータをトランスポンダ回路内のデジタル集積回路に適用し実装性を確認した。

キーワード RFID、アンチコリジョン、TH-CDMA、高位モデル化、バックエンド設計、トップダウン手法、ロバスト性

Application for Back-End Design of a Highly Collision-Resistive RFID System through High-Level Modeling Approach

Yohei FUKUMIZU[†], Makoto NAGATA^{††}, and Kazuo TAKI^{†††}

[†] Graduate School of Science and Technology, Kobe University
^{††} Department of Computer and Systems Engineering, Kobe University
^{†††} AIL Co., Ltd

E-mail: †fukumizu@cs26.scitec.kobe-u.ac.jp, ††nagata@cs.kobe-u.ac.jp, †††taki@ailabo.co.jp

Abstract A highly collision-resistive RFID system multiplexes communications between thousands of transponders and a single reader using TH-CDMA based anti-collision scheme. This paper focuses on the back-end design consideration of such an RFID system with the deployment of high-level modeling techniques. A new rapid-prototyping simulation system was constructed to evaluate the robustness of a multiplexed RFID link system with more than 1,000 channels in the presence of field disturbances, and the design parameters of the back-end digital signal processing that dominated anti-collision performance were explored. Finally, the derived optimum parameters were applied to the design of a back-end digital integrated circuit to be installed in collision-resistive transponder circuitry.

Key words RFID, anti-collision, TH-CDMA, high-level modeling, back-end design, top-down approach, robustness

1. はじめに

近年、情報処理技術の急速な発展に伴って、個体を自動的に識別する必要性が増加している。特にRFIDシステム[1]は、従来から世界中で広く使われてきたバーコードシステムを遥かに凌駕する性能を呈するため、世界的な注目を集め巨大市場を築きつつある。

本稿ではRFIDシステムの高位モデル化とバックエンド回路

の設計事例について報告する。RFID通信を実現するアナログフロントエンドの回路設計については様々な側面からの多くの報告があるが、一方で多重通信を実現するデジタルバックエンド処理系についての考察はまだ十分なされていない。そこで、本研究の目的は高位モデル化手法によるデジタルバックエンドの設計指針を確立することにある。さらに、RFIDシステムのアンチコリジョン性能を大きく左右する設計パラメータについて深く解析する。これらのパラメータはデジタルバックエンド

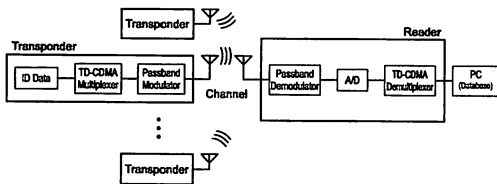


図1 超多重応答 RFID システムの概念図

処理系のプロトタイプ設計に用いられる。

以下、2 節で対象とする超多重 RFID システムとその通信手法について紹介し、3 節において構築した高位モデル化シミュレータについて記述する。4 節にて、1,000 個を超えるトランスポンダの外乱に対する耐性から多重通信性能を分析し、トランスポンダにおけるバックエンドのデジタルバックエンド処理系についての設計例を示す。5 節でまとめを行う。

2. 超多重 RFID システム

2.1 概 要

RFID システムはトランスポンダとリーダから構成される [2]。図 1 にシステム全体のブロック図を示す。トランスポンダを内蔵しているタグは識別すべき個体に取り付けられ、リーダの応答範囲に入ると応答し始める。すなわちトランスポンダは ID 値を送信し始め、リーダがそれを受信することでシステムは個体を識別する。トランスポンダは自立した電源を持っておらず、リーダからの誘導結合により電力供給されて動作する。ID 値はトランスポンダに内蔵されている ROM に記憶されており、多重化および変調された後にアンテナから送信される。一方、リーダは受信した信号を復調し、多重信号を分離したのちに誤り検出を行い正しい ID 値をデータベースに蓄積する。トランスポンダはそれぞれ固有の ID 値を保持しており、これにより個々の識別が可能となる。すなわちリーダは ID 値を受信すると、それを ID データベースを持つ PC に送り、対象とする個体がリーダの応答範囲に存在するかどうか決定する。本稿の対象とする RFID システムは参考文献 [2] で提案したアンチコリジョン方式を想定しており、重要な概念について以下の節に簡単にまとめる。

なお、提案したシステムでは電力供給の搬送波は 13.56 MHz 帯を用いる。一方、ID 変調はインパルスを用いるので広帯域を必要とする。スペクトル拡散のパラメータは、チップレートが 13.56 MHz、拡散率は 16 である。したがって転送速度は 327 kbps である。

2.2 ダウンリンク

(a) 電力供給

トランスポンダは非接触給電により動作する。このときトランスポンダがアンテナから供給されるのは AC 電圧 [3] であるが、デジタルバックエンド回路は DC 電圧で動作するため、トランスポンダは供給された電力を整流する必要がある。具体的には全波整流器をトランスポンダのアンテナであるパイファイラコイルに接続する。トランスポンダの電力源であるコンデンサは面積上の制約で最低限の容量しか持たせられないので、ト

ランスポンダ回路の消費電力は最小限に抑えられなければならない。

(b) 同 期

一般的に多重通信システムにおいては、トランスポンダとリーダで同期を取ることが不可欠である。しかし、これにはタイミング抽出やトラッキング制御といった負荷の高い演算が必要であり、大規模な回路を要求する。そこで、このような処理を排除するために同期パルスを用いる。すなわち電力供給波を適当なタイミングで 1 パルスの間、 180° 反転することにより双方の同期をとる。これにより電力消費を抑えつつ、同期を取ることができる [4]。

2.3 アップリンク

(a) 一次変調方式

多くの RFID システムでは、一次変復調方式として負荷変調に基づく ASK 変調を用いている [5]。しかし、負荷変調は送信動作中の全トランスポンダが内部のインピーダンスを各々変化させることになるので、インピーダンス整合が困難であり電力を十分かつ均一に供給することができない。また、一般的なデジタルの一次変調方式として、振幅変調 (ASK)、周波数変調 (FSK)、位相変調 (PSK) などが挙げられるが、これらの変調方式はトランスポンダにオシレータを必要とするので消費電力を抑えることができない。そこで提案方式では、一次変復調としてインパルス変調 [6] を用いる。これにより消費電力を抑えつつ省スペースでトランスポンダ回路が実現できる。

(b) TH-CDMA 変調

本システムでは TH-CDMA により数千個のトランスポンダの同時識別を実現する。TH-CDMA とは、DS-CDMA と TDMA を組み合わせて、拡散符号および回路規模を減らした方式である。トランスポンダとリーダは一次変復調回路と同様、個々に TH-CDMA 変復調回路を持つ。

リーダがトランスポンダごとに異なる通信チャネルを決定し、各トランスポンダに通知していた従来システムと異なり、本システムでは事前折衝を行わない。すなわちトランスポンダが、疑似乱数系列生成回路 (PRSG) を用いて、1,000 以上の通信チャネルから 1 つを自発的に選択し使用する。これにより通信処理を単純化し、トランスポンダの消費電力を低減することができる。TH-CDMA による多重化において一連の拡散/逆拡散手続はデジタル処理により実装される。

一般的に CDMA 通信では受信信号の強度が変動することに注意しなければならない。これには 2 つの要因が挙げられる。その 1 はトランスポンダが ID 値を送信している間における送信信号の強度変動であり、その 2 はリーダにおける受信信号の強度の変動である。前者は提案手法では影響がおきない。なぜならば、送信動作中はトランスポンダ内部のレギュレータとキャパシタの働きによって送信電力が一定に保たれるからである。

しかし後者は、トランスポンダとリーダアンテナの距離によって変動する。全てのトランスポンダは、リーダの応答範囲である 1 m^3 の空間内に存在するためアンテナの配置とリーダでの信号処理により信号強度の変動を最小限にする必要がある。高位モデル化手法を用いることで、これらの外乱に対して

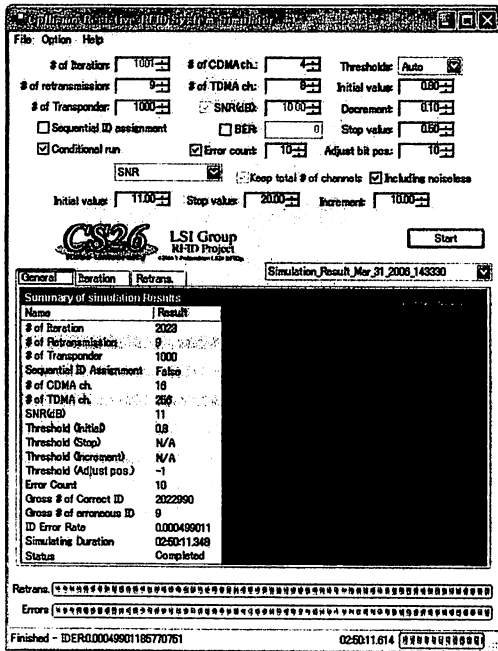


図2 シミュレーションシステムのスクリーンショット

最適化を行うことが可能となる。

3. RFID通信の高位モデル化

外乱に対する多重通信システムのロバスト性を評価するため、ソフトウェアによるシミュレーションシステムを構築した。このシミュレータは複数のトランスポンダと単一のリーダで仮想的に通信を行わせることにより、衝突確率およびエラー発生率をモンテカルロ法に基づく確率値として導き出す。

このシミュレーションシステムはMicrosoft Windowsの.NET Framework 1.1上で実装された。スクリーンショットを図2に示す。シミュレーションパラメータはGraphical User-Interface (GUI)を通じて柔軟に設定することができるので、システムの幅広い動作状況に応じたエラー発生率を導き出すことができる。

構成する仮想的なRFIDシステムの動作を可能な限り現実のシステムに近づけるため、シミュレータはC#言語を用いてオブジェクト指向プログラミング(OOP)により実装されている。シミュレーションシステムは図3に示される通り、主に3つのクラス、すなわちトランスポンダクラス、チャネルクラス、リーダクラスから構成される。各クラスはそれぞれ実際のモジュールと同等の機能性を提供する。これによって、理想的な状態だけでなく現実に即した環境におけるシステム動作を模倣することが可能となっている。

3.1 トランスポンダクラス

トランスポンダクラスはランダムに割り当てられたIDを含むオブジェクトである。このクラスにおいては内蔵メカニズムによってTH-CDMAチャネルを割り当てて、チャネルクラスにCDMAで変調された信号を出力する。ここで、“TH-CDMA

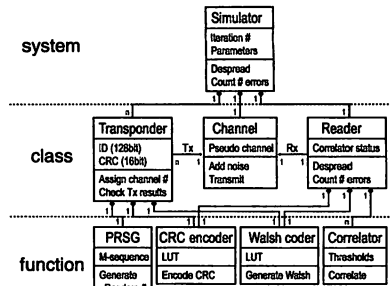


図3 シミュレーションシステムの構成図

チャネル”とはTDMAによる時分割スロットとCDMAによる拡散符号を組み合わせた多重チャネルを意味する。シミュレータは同時通信数と同じだけのトランスポンダクラスをメモリ上に確保し、個別にID送出を行わせる。なお、このシミュレータは最大で65,536個のトランスポンダを模倣することが可能である。各トランスポンダはCyclic Redundant Code (CRC) エンコーダ、PRSG、Walsh符号(拡散符号)生成器を内蔵するべきであるがこれらの基本機能は占有メモリ量を削減するためにすべてのトランスポンダクラスで共通のものを使用する。また、適宜テーブルルックアップを適用することでシミュレーション速度を高速化する。

3.2 チャネルクラス

多重化通信チャネルをシミュレーションするために、チャネルクラスが定義されている。このクラスは各トランスポンダクラスから出力信号値を受け取って疑似チャネルを模擬的に伝搬させ、リーダに受け渡す。チャネルクラスはすべてのトランスポンダによる通信をTH-CDMA方式にしたがって多重化して単一の配列に格納し、通信環境の白色雑音を加える。得られた多重通信値はリーダクラスに引き渡される。このクラスの実装を修正することによって、実際の物理的性質に即したさまざまなシミュレーションを柔軟に実施することが可能となる。たとえば、各々のトランスポンダに重み係数を導入することによって、リーダ応答範囲内を移動しているトランスポンダのリーダアンテナとの距離に応じて起こる信号劣化を模倣することができる。

本稿では、各トランスポンダとリーダアンテナとの距離はすべて等しいと想定した分析結果を示す。これは非常に理想的な状態であって現実的ではない。それでもなお、最適な設計パラメータを調査することは可能であり、これによって高位モデル化手法の有効性を示す。なお、構成したシミュレータにおいては個々のトランスポンダに個別の重み係数を割り当てることで信号強度の分散を模倣することも可能である。

3.3 リーダクラス

リーダクラスはチャネルクラスから受けとった多重信号値を復調してから相関関数を用いてTH-CDMA方式により逆拡散し、誤り検出する。可能性のあるすべてのチャネルを逆拡散する必要があるため、リーダクラス内に割り当てられる相関器クラスの数は実行する多重通信におけるCDMAチャネル数に等

しく、各相関器には逆拡散過程に必要となる個別の Walsh 符号が割り当てられている。リーダクラスがチャンネルクラスよりデータを受け取ると、それをすべての相関器クラスに分配する。相関器は受信データと Walsh 符号の積和をとって TDMA チャンネル別に用意された配列に First-In First-Out (FIFO) 方式で記録することでその相関値を導出する。言い換えれば、個々の TDMA チャンネルに対応する FIFO バッファが相関器に確保されている。そして、それぞれの TDMA チャンネルごとの相関値がバッファメモリに蓄積される。Walsh 符号列との積和を取り終わると、相関器は閾値判定によって ID ビットを決定する。リーダクラスは、この逆拡散結果を CRC 誤り検出関数に基づいて誤り検出する。最終的にトランスポンダから受信した ID はデータベースと照合して実際に送出された ID と等しいことを確認する。これは、正しく逆拡散できて CRC による誤り検出も通過したにも関わらず、データベース内にあるいずれの ID とも一致しない、いわゆるゴースト ID の存在によるものである。これらは TH-CDMA による多重通信において TDMA/CDMA チャンネルが衝突することによって起こるものであり、トランスポンダがランダムでチャンネルを選択する以上、確率的に発生するエラーである。当然ながらゴースト ID は誤った ID とみなされるべきである。

3.4 シミュレーションシステムの動作

図 4(a) はシミュレータを構成するそれぞれのクラスが行う通信動作を示している。図 4(b) はシミュレーション実行中に表示される通信状況ウィンドウのスクリーンショットである。このウィンドウは通信中の全トランスポンダ ID の通信状況をリアルタイムに表示する。ここに表示される受信状況は 3 種類あって、すなわち (1) 正常に受信できた ID、(2) 受信機の相関器で逆拡散できなかった ID、(3) CRC エラーが検出された ID を表す。これらの誤りに関するデータとゴースト ID の数はシミュレーションが完了した後には計数されエラー発生率が求められる。

この通信状況ウィンドウを観測することで各トランスポンダの通信状況が明らかとなり、直感的にパラメータの調整を行うことができる。たとえば図に示したスクリーンショットでは、およそ 80% のトランスポンダが正しく通信できているおり、18% が相関器で積和演算を行った結果、閾値エラーを起こしている。また、残り 2% は CRC によって通信エラーが検出されたことを示している。

4. 1,000 を超える RFID 多重通信の解析と設計

4.1 概要

本節では、3 節にて述べた様々なシミュレーションの解析を通して、1,000 を超える多重 RFID 向け通信システムの最適な設計パラメータセットを抽出する。

TH-CDMA による同時通信数は最大で $N = s \cdot c$ と定義される。ただし、TDMA スロット数は s 、CDMA 符号数は c であらわされる。 s あるいは c を増加することにより、TDMA/CDMA チャンネルを通じて同時送信可能なトランスポンダ数も同様に増加する。チャンネル衝突による通信エラーを削減するために、各

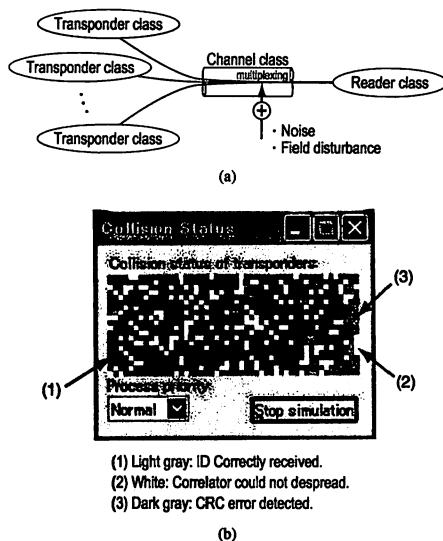


図 4 (a) シミュレータの動作図 (b) 通信状況ウィンドウのスクリーンショット

トランスポンダは ID の送信が完了すると再送が始まる前に内蔵の PRSG によりチャンネル番号を再び割り当て直す。ここで再送数を x と定義すると、それぞれの ID の全ビットを送出するのにかかる時間 T_t は次のように与えられる。

$$T_t = T \cdot (l_{ID} + l_{CRC}) \cdot s \cdot c \cdot x$$

ただし、ID 長を l_{ID} 、CRC 長を l_{CRC} 、1 bit あたりの送出時間を T とする。チャンネル数を増加することによって、同時に識別できるトランスポンダ数を増やすことができるものの、一連の通信にかかる時間 T_t はアプリケーションの運用上の制約に依存して一定であるため、チャンネル数と再送数の間にはシステム性能を左右する重要なトレードオフが存在する。

本稿では基準として 2 種類の誤り量を定義する。すなわち ID エラー発生率 (ID error rate; IDER) とゴースト ID 数 (Number of erroneous IDs; NEID) である。IDER は x 回の再送を行った後、すなわち T_t の通信時間の中で識別に失敗したトランスポンダの存在確率をあらわし、NEID は 3.3 節で定義したところのゴースト ID 数の、再送数 x に対する比率である。これは衝突に伴って起きる潜在的なエラー発生率をあらわしている。

4.2 RFID 通信における外乱の影響

4.2.1 雑音のある環境でのチャンネル衝突

通信時間 T_t が 400 msec 以下であり CDMA 符合数 c が 16 であるパラメータセットにおいて、TDMA スロット数 s が 512 の場合と 256 の場合の異なる 2 種類を想定し、環境雑音つまり外乱の IDER に対する影響と再送数と IDER の関係を調査した。このとき再送は s が 512 のとき 4 回、256 のとき 9 回まで行うことができる。このときの環境雑音としては信号対雑音比 (SNR) で 5、10、15、20 dB ならびに無雑音を想定した。結果を図 5 に示す。

図 5 において IDER が少なくなるにつれてチャンネル雑音に

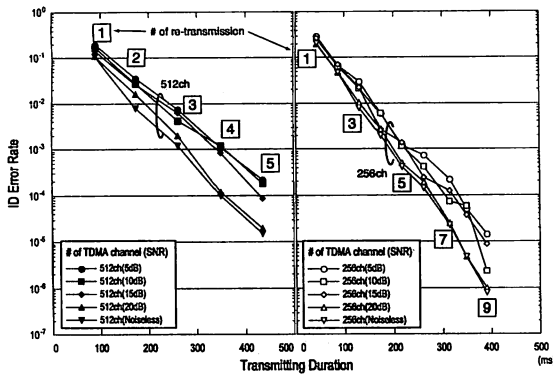


図5 雑音環境下における IDER と TDMA チャンネル数の関係

よる影響が増大することがわかる。例えば、 T_t が 400 msec の近傍では、無雑音の環境と SNR が 5 dB の環境では IDER が 10 倍近い差を示している。この図より雑音レベルがどうあれ、再送数を増加することで IDER を軽減することができることが明らかになった。特に、エラー発生率の改善効果は TDMA スロット数 s を半減して、再送数 x を倍増した後者のパラメータセットのほうが高い。このエラー発生率の改善によって雑音による影響を減らすことができる。

4.2.2 チャンネル容量

チャンネル衝突に対する耐性を評価するため、SNR で 20 dB の雑音のある通信チャンネルを想定し、トランスポンダ数を通信方式の想定する同時識別数である 1,000 から、その倍の 2,000 まで増やしつつシステムのシミュレーションを行って IDER を求めた。このとき、通信チャンネル数 $s \times c$ を 4,096、8,192、16,384、32,768 とした。前提条件として T_t を 400 msec と設定したので、再送数 x はそれぞれ 9 回、4 回、2 回、1 回と与えられる。図 6 に結果を示す。これによると、同時に通信するトランスポンダ数が多くなったとしても、チャンネル数を増加するよりも再送数を増加するほうがよい結果を示している。しかも、再送を増やしてチャンネル数を減らすとトランスポンダの衝突確率そのものは高くなる。図 6 では曲線の傾きによって与えられ、チャンネル数が少ないとトランスポンダ数の増加に伴って急激に IDER の劣化が起こる。ここで、チャンネル数が 4,096、再送数が 9 回、トランスポンダ数が 2,000 個のとき IDER は 1.83×10^{-4} を示し、これはトランスポンダ数が 1,000 個のときに比べて約 100 倍の劣化が起きている。すなわち 2,000 個の同時識別につき 0.366 個の誤りであり、これはチャンネル数を 8,192、再送数を 4 回としたときの 1,000 個の同時識別の値とほぼ変わらない。よってトランスポンダ数がシステムの想定するチャンネル容量を超過する場合においても再送数を増やすことで IDER を改善できることが明らかになった。

4.2.3 TDMA/CDMA チャンネル分配

通信チャンネル数は TDMA スロット数 s と CDMA 符号数 c の積で与えられるが、これは送受信時間 T_t と再送数 x により制限されている。TDMA および CDMA チャンネル数の最適な配分を導き出すために、400 msec の通信時間において 9 回の再

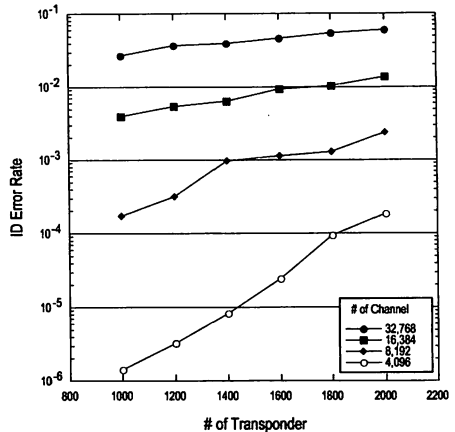


図6 チャンネル容量と IDER の関係

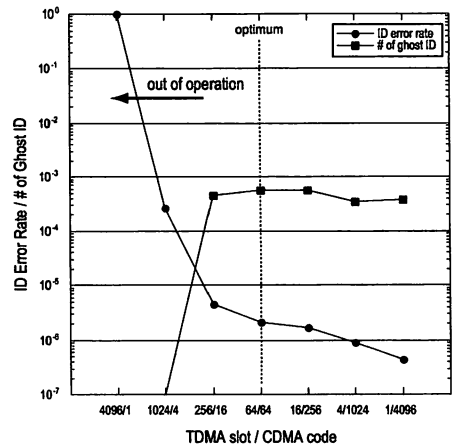


図7 チャンネルの分配率による IDER/NEID への影響

送を可能とするとの条件設定のもと、システムシミュレーションを実施した。すなわち、システムのチャンネル総数は 4,096 である。このときの s/c の比率による IDER ならびに NEID の影響を導き出すため、この比率を変化させてシミュレーションを行った。結果を図 7 に示す。このときの雑音レベルは SNR で 10 dB と仮定した。

c が増加すると IDER は減少し、全チャンネルを CDMA に配分したとき最小値を示す。一方で、興味深いことに NEID は分配率に大きく影響されないことがわかる。よって CDMA 符号数を増やすことで IDER を削減することができるが、これは同時にリーダの設計を困難にするとともに、トランスポンダの動作を不安定にすることになる。すなわち、リーダにおいては可能性のあるすべての CDMA 符号を並列して逆拡散しなければならないため、リーダに内蔵される符号相関器の総数が符号数に伴って指数関数的に増大する。もちろん、リーダの回路規模も同様に増大する。一方、トランスポンダは TDMA スロットを待つことによる間欠的な動作によって、外部にある電源からキャパシタへの非接触給電を確実にしているため、TDMA

表1 シミュレーションにより抽出された最適パラメータ

	Simulated
r # of CDMA ch.	64
x # of TDMA ch.	64
t_{TX} : Time duration [ms]	391.5
k # of re-transmission	9
P_e : ID Error Rate (IDER)	2.09×10^{-6}
N_e # of Erroneous ID (NEID)	5.79×10^{-4}

表2 トランスポンダ・デジタルバックエンドの設計諸元

	Layout
Process	0.35- μm CMOS@3.3 V
# of transistor	10,558
Digital back-end	115,800 μm^2

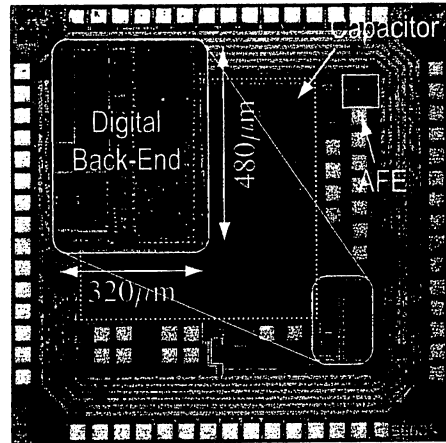


図8 トランスポンダ設計例

チャンネル数を減らすとトランスポンダの電力確保が問題となる。したがって CDMA チャンネル数はエラー発生率の低減に寄与するが、これらの考察に基づいて制限される。以上の議論より $c=64$ かつ $s=64$ の場合がもっとも最適な分配であると考えられる。

4.3 ロバストな RFID 通信向けバックエンドの設計

アナログフロントエンドの設計については既に議論 [4] がなされているので、本節では最適化されたデジタルバックエンド処理を内蔵するトランスポンダの設計例について議論する。

外乱に対して十分なロバスト性のもと、1,000 を超える多重 RFID 通信を可能とする最適システムパラメータセットは前節での議論より導出することができる。まとめると再送数はチャンネル数よりもエラー発生率の削減に大きく関与するとともに、環境雑音が増加した場合やチャンネル容量に対してトランスポンダ数が超過した場合のロバスト性の改善にも寄与する。表1に最適化したパラメータをまとめる。

システムパラメータの実装性を確認するために、デジタルバックエンド部を 0.35- μm CMOS プロセス^(注1)にて実装した。図8は設計したチップ写真を、表2に設計データを示す。1,000 を超える RFID 通信向けバックエンド設計は 4.2 節で述べたような外乱に対するロバスト性を確保するために多くのシステムパラメータを考慮する必要があるが、それでもトランスポンダのバックエンド回路におけるトランジスタ数を十分低く抑えることが可能である。デジタルバックエンドは、2,400 $\mu\text{m} \times 2,400 \mu\text{m}$ のチップ面積に対して 2% である 340 $\mu\text{m} \times 340 \mu\text{m}$ と実装面積は十分に小さい。そのため、チップ面積のほとんどをキャパシタに使用することが可能である。

5. まとめ

本稿では、高位モデル化手法を用いた超多重 RFID システム向けバックエンド設計事例を報告した。今回新たに構築したシミュレータは高速にモデル化することができるので、いくつもの外乱に対する多数のトランスポンダが応答する RFID システムのロバスト性を評価することを可能にした。再送の効果は環

境雑音のある状況においても単なる誤り率のみならずシステムの許容量に対しても効果的であることが確認された。

また、チャンネル分配の分析を通して CDMA 符号数は雑音耐性に大きく影響するものの、一方でゴースト ID の数は CDMA 符号と TDMA スロットの比率に関わらないことが示された。最適なパラメータセットをシミュレーション結果より抽出しトランスポンダのバックエンド回路に実装した。その結果、小面積を保持したままより強度の高い RFID 通信を実現するバックエンド処理が可能となった。これらの分析を通して、1,000 チャンネルを超える RFID システムの設計において高位モデル手法が有効であることを示した。

文 献

- [1] M. Usami, A. Sato, K. Sameshima, K. Watanabe, H. Yoshigi, and R. Imura, "Powder LSI: An Ultra Small RF Identification Chip for Individual Recognition Applications," IEEE International Solid-State Circuits Conference 2003 Digest of Technical Papers, pp.398-399, Feb 2003.
- [2] Y. Fukumizu, S. Ohno, M. Nagata, and K. Taki, "Communication Scheme for a Highly Collision-Resistive RFID System," IEICE Trans. on Fund., vol.E89-A, no.2, pp.408-415, Feb 2006.
- [3] T. Umeda, H. Yoshida, S. Sekine, Y. Fujita, T. Suzuki, and S. Otaka, "A 950MHz Rectifier Circuit for Sensor Networks with 10m-Distance," IEEE International Solid-State Circuits Conference 2005 Digest of Technical Papers, pp.256-257, Feb 2005.
- [4] Y. Fukumizu, S. Ohno, M. Nagata, and K. Taki, "Design of RFID Front-end Circuitry Enabling CDMA-based Collision Resistance," in proc. of 2004 International Conference on Solid State Devices and Materials, pp.400-401, Sep 2004.
- [5] Y. Li and J. Liu, "A 13.56MHz RFID Transponder Front-End with Merged Load Modulation and Voltage Doubler Clamping Rectifier Circuits," proc. of 2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, pp.5095-5098, May 2005.
- [6] C.H. Yang, Y.H. Lin, S.C. Liu, and T.D. Chiueh, "Design of a Low-Complexity Receiver for Impulse-Radio Ultra-Wideband Communication Systems," proc. of 2004 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, pp.125-128, May 2004.

(注1)：本チップ試作は東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通して ローム (株) および凸版印刷 (株) の協力で行われたものである。