

氏名	やまぐち あつよし		
授与学位	山口 敦 由		
学位授与年月日	博士 (工学)		
学位授与の根拠法規	平成18年3月24日		
研究科, 専攻の名称	学位規則第4条第1項		
学位論文題目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻		
指導教員	パケット無線通信システムの研究		
論文審査委員	主査	東北大学教授 坪内 和夫	東北大学教授 澤谷 邦男
		東北大学教授 安達 文幸	

論文内容要旨

今日、「いつでも・どこでも・だれとでも」相互に情報交換可能なユビキタスネットワークの実現が求められている。このユビキタスネットワークの実現には無線通信技術が重要な役割を果たすと考えられ、用途に応じた様々な形態の無線ネットワークを構築すること、そして様々な形態の無線ネットワークを区別することなく利用可能であること、つまりユーザが接続先の無線ネットワークの形態を意識せずにシームレスな接続が可能であることが求められると考えられる。無線通信の交換方式に着目すると、シームレスな通信という面から汎用性の高さが求められ、また、データ通信の需要が増大していることから現在はパケット交換方式が主力となっており、将来は無線ネットワーク同士をインターネット経由でリンクするようになると考えられる。

ここで、パケット交換型無線通信はいくつかの問題を抱えており、本論文ではその中でも特に重要性の高い同期問題について取り上げる。同期問題はさらに、物理層における課題と上位層における課題の二つに分けられる。

物理層における同期問題はバースト通信に由来する課題である。パケット交換方式では送信側はデータを複数のパケット単位に区切って通信するため、受信側ではパケット毎に同期が必要であり、かつ、高速に行わなければならない。ここでは、チップ同期、シンボル同期、位相同期、周波数同期などが課題となり、これらは連動して行う必要がある。このため、1パケット内の時間で高精度周波数偏差検出・補償を行う方式が必要となる。

上位層における同期問題は無線リンクの接続・切断に由来する課題である。移動体ネットワークやRFID (Radio Frequency Identification) 等、1つの親機-複数の子機端末間リンクにおいて、接続・切断が頻発するアプリケーションではシームレスな通信の実現が重要な課題であり、高速かつ多数の

端末に対応した端末識別方式が必要となる。

そこで、第2章では、物理層における課題であるキャリア周波数偏差補償回路の設計と評価について述べる。キャリア周波数偏差の問題というのは、送受信器の局部発振器に発振周波数差があると、受信器では受信信号にI・Q軸平面上で位

相回転が発生してしまうという問題である。これに対し、パケット交換型無線通信では、1パケット内の時間で高精度に周波数偏差を検出・補償しなければならない。従来のパケット交換型無線通信方式の例としては、無線LAN（Local Area Network）がある。IEEE（the Institute of Electrical and Electronic Engineers）802.11aでは常にパイロットサブキャリアを送信し、位相を追跡する方式を用いているが、オーバーヘッドが大きいという問題がある。IEEE802.11bでは差動符号化を行い、遅延検波をすることで周波数偏差の影響を軽減しているが、同期検波方式と比較して E_b/N_0 が3dB劣化してしまうという問題がある。このため、同期検波方式で高精度にキャリア周波数偏差を検出し、かつ、オーバーヘッドを抑制できる方式が必要となる。

この問題を解決するために、新しいキャリア周波数偏差補償回路を提案する。通信パケットには、図1に示すように、我々がこれまでパケット通信用に提案してきたパケットSS-CDMA（Spread Spectrum - Code Division Multiple Access）方式を用いる。パケットは同期プリアンブル部とデータ部を分離した構成となっており、送信器では同期プリアンブル部で11-chipバーカ符号A～Dを4symbolバースト送信し、受信器ではDMFにより同期を行う。また、データ部では114symbolを128-chip直交M系列を用いて拡散して24ch束ねて送信し、受信器ではインライン相関器により低消費電力での逆拡散を行うことが可能となっている。

さらに、キャリア周波数偏差の検出機能を加えるために、データ部に11-chipバーカ符号パイロット信号EとFを挿入する。受信器では、DMFにより6本の11-chipバーカ符号相関ピークA～Fが得られる。まず、既知の送信側の絶対位相と実際に受信したプリアンブル部相関ピークA～Dの位相差より、初期位相偏差を検出する。次に、ピークDとEの位相差より、キャリア周波数偏差による受信位相の回転方向を検出する。さらに、ピークDとFの位相差よりキャリア周波数偏差による受信位相の回転量を検出する。これらの情報を用いてデータ部に対し位相回転を行うことで、キャリア周波数偏差補償が可能となる。このように、提案方式では6本のパイロット信号のみで同期と周波数偏差の検

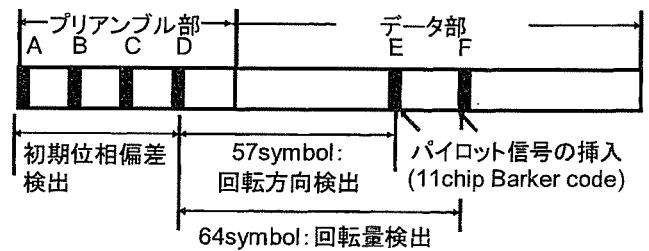


図1:通信パケット構成

出が可能となる。

このキャリア周波数偏差補償回路をFPGA上に実装し、実測による性能評価を行った。 E_b/N_0 対 BER特性の実測結果を図 2 に示す。これより、 $BER=10^{-3}$ において 0.3ppmの偏差における E_b/N_0 の劣化は約 2dBとなっており、パースト通信の課題である、同期検波方式で高精度なキャリア周波数偏差の検出を行い、かつオーバーヘッドを抑制するというキャリア周波数偏差補償回路を実現したといえる。

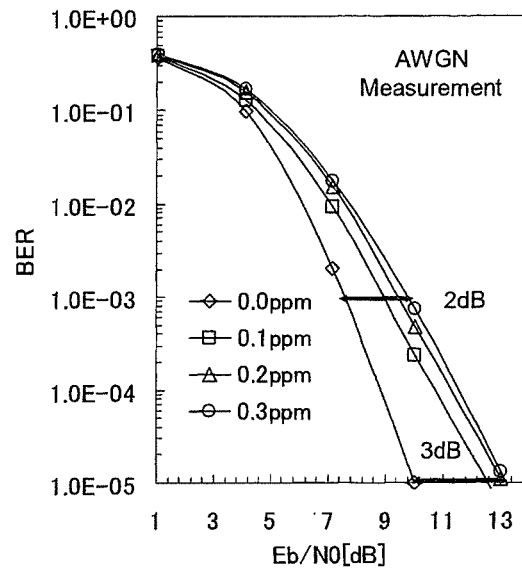


図2：キャリア周波数偏差補償回路実測結果

第 3 章では、上位層における課題である端末識

別について、フラグを用いた高速端末識別方式の設計概念と実測による性能評価について述べる。移動体ネットワークやRFID等、1つの親機-複数の子機端末間リンクにおいて、接続・切断が頻発するアプリケーションではシームレスな通信の実現のために、親機が交信範囲内の無線端末を高速に識別する技術が必要となる。移動体ネットワークでは無線端末自体が高性能なため、従来のセルラー通信の高度な端末識別方式を導入可能であるが、RFIDネットワークでは低コスト化のため、簡単な端末識別機能しか搭載できない。そのため、RFID用高速端末識別方式の実現が重要な課題となる。

RFIDの端末識別というのは、R/W（親機）が交信範囲内全てのRFIDタグ（子機）IDの名簿を作成する処理である。ここで、R/Wが全てのRFIDタグにIDを尋ねると、同時に複数の応答が返ってしまい、応答パケットの衝突が発生して正しく受信できないため、複数のRFIDタグに同時に応答させない（アンチコリジョン）技術が重要となる。

一般的に用いられている端末識別方式としては、図 3 の従来方式に示すFrame Slotted ALOHA（ランダムアクセス）方式がある。これは、R/Wの用意した複数のタイムスロットのうち1つを、各RFIDタグがランダムに選んで自IDを送信するというものである。ランダムアクセス方式は、非常に単純で、RFIDタグ数が少ない場合は高速に収束（全端末識別）可能であるという特徴がある。しかし、RFIDタグ数が多い場合はパケットの衝突が頻発して収束しない場合が発生する。衝突を減らすためにはタイムスロットを多く用意する必要があるが、その代わり収束に時間を要してしまう。このため、高速化のためにはスロット数を増やしても時間を要しない方式が必要となる。

この問題を解決するために、フラグを用いた端末識別方式（フラグ方式）を提案する。フラグ方式は、従来同時に行っていたRFIDタグの存在を確認する処理（ランダムアクセス試行）とRFIDタグのIDを認証する処理を分離する。ID認証ではIDの情報が必要となるが、タグの存在確認には必要ない。そこで、従来存在確認には100bit程度のIDを送っていた

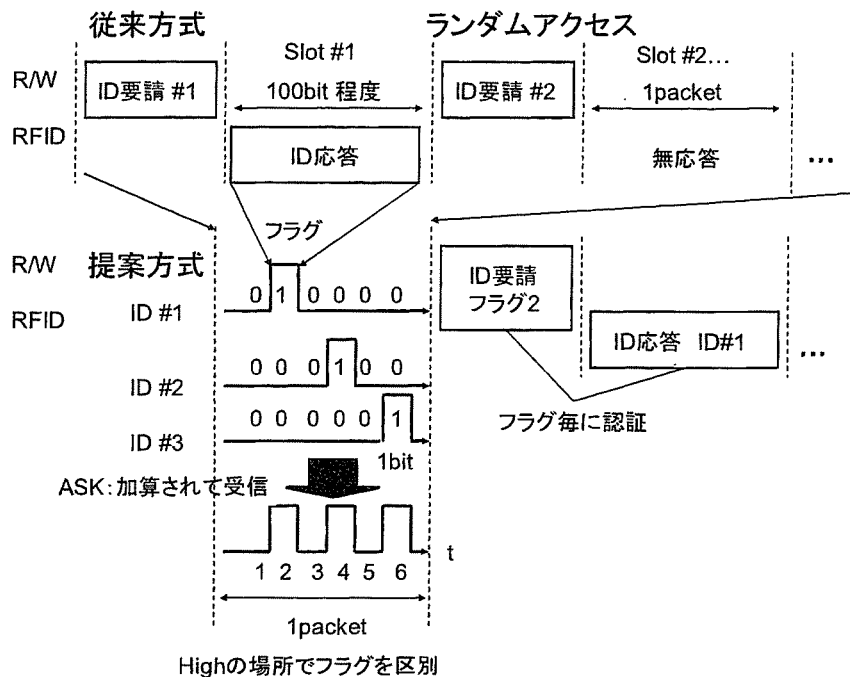


図3：ランダムアクセス方式・フラグ方式の概念

ところを、1bitのフラグに置き換えることにより高速化を図るものである。これについて図3の例を用いて説明する。フラグ方式では、R/Wのフラグ要請に対し、各RFIDタグは1パケット中1箇所だけHigh、それ以外はLowというパケットを送信する。Highの場所はランダムに決める。RFIDでは変調方式としてASKが最も多く採用されており、この場合R/Wは各RFIDタグのフラグパケットが重なって受信される。ここから、Highとなった場所の違いによりフラグを区別することができる。この例では、2番の場所でフラグが立っており、R/Wは2番のフラグに対してID応答を要請する。これに対し、2番のフラグを送った1番のRFIDタグがID応答を返す。3番のロットは空ロットのため、次は4番のフラグに対してID応答を要請する。このため、従来タグの存在を100bit程度のIDにより表現していたところを、フラグ方式では1bitという短時間で表現でき、また、応答の無い空ロットも1bitに短縮できる。さらに、従来は同期と給電のためにR/Wはロットの切り替わり毎にロット番号を通知する必要があったが、フラグ方式ではランダムアクセス試行をまとめて1パケットで行うため、ロット番号通知を省略することができる。このため、フラグ方式ではランダムアクセス試行を短時間で行うことができ、高速な端末識別が可能となる。

フラグ方式では多数のRFIDタグに対応するためにはフラグロット数を増やせばよいが、パケット構成上の制限があり、対応できるRFIDタグ数には限界がある。そこで、マスクを用いてRFIDタグを複数のグループに分け、1度に識別するタグ数を減らす方式を導入する。マスク方式では、グルー

ブ数を最適化するために前出のランダムアクセス試
行を繰り返す必要があるため、マスクの設定自体に
時間を要するという問題があり、ISO (International
Organization for Standardization) 標準規格には採
用されていないが、フラグ方式では短時間に行うこ
とができるため、マスク機能を有効活用することが
できる。

このフラグ方式を、ZigBee用チップに実装して実
測による収束性能評価を行った。ここでは実装のた

め、1bitのフラグの代わりにパケットとして認識できる最小限の長さのパケットをフラグとするパ
ケットフラグ方式を用いて行った。

実測には、収束までにR/W・RFIDタグの送信する総パケット長で評価した。比較対象にはフラグ
方式の基となったランダムアクセス方式を採用しているISO14443 Type Bを用いた。実測結果を図4
に示す。提案方式はRFIDタグ数と総パケット長が比例しているが、これはマスクにより1度に識別
するRFIDタグ数を調節する機能が働いているためであり、多数のRFIDに対応可能であることを意味
している。また、RFIDタグ数100個では従来方式の約3.7倍の高速化が可能となっている。よって、
端末識別の課題である、高速、かつ多数のRFIDタグに対応可能な端末識別方式を実現したといえる。

以上により、パケット交換型無線通信ネットワーク実現のために、高速・高精度同期技術を確立し
た。

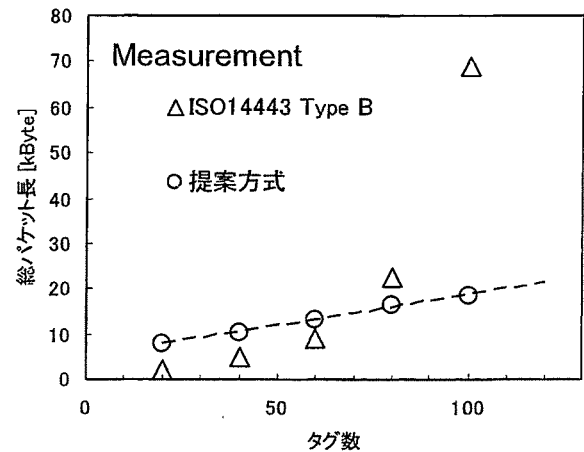


図4：パケットフラグ方式実測結果

論文審査結果の要旨

利用者が端末を種々のネットワークへシームレスに接続して利用可能となるようなユビキタスネットワークの実現のためには、無線通信へのパケット交換方式の導入が必須である。パケット信号受信のためには高速同期技術が重要な課題である。本論文は、パケット無線通信における高速同期を目指し、物理層及び上位層における高速同期の課題であるキャリア周波数偏差補償技術及び端末識別技術について行った研究をまとめたものであり、全文4章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、無線通信を行う際に発生するキャリア周波数偏差による受信信号ベクトルの位相回転を補償する、キャリア周波数偏差補償方式について述べている。遅延検波に比べてビット誤り率特性は良好であるが高精度な検出精度が要求される同期検波方式において、6本のパイロット信号を用いることにより、スループットの低下を最低限に抑えつつ、0.3ppm以下のわずかなキャリア周波数偏差を検出し補償できる方式を実現している。このキャリア周波数偏差補償技術は、無線LANのほか、パケット交換型無線通信を行う通信システムに広く適用可能であり、極めて重要な成果である。

第3章では、多数の端末の高速識別技術であるアンチコリジョン方式について述べている。特にここでは端末数が多いシステムであるRFIDを例に議論している。従来方式において、端末数が極めて多い場合には端末IDの識別に長時間を要してしまうという問題があった。これに対して、短いフラグを用いてパケットの重ね合わせを行う手法を提案し、従来方式の2倍～10倍の高速化が可能であることを述べている。このアンチコリジョン方式は既存の技術の性能限界を打破するものであり、極めて重要な成果である。さらに、本方式はRFIDのみならず、複数端末で同時に通信を行うような無線システムに広く適用可能であり、その成果は極めて重要である。

第4章は結論である。

以上要するに本論文は、パケット無線通信における高速・高精度キャリア周波数偏差補償技術及び高速端末識別技術を確立し、その良好な同期性能を実証したものであり、電子工学ならびに無線通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。