

国内 ETC システム用 5.8 GHz 無線通信機の開発

Development of 5.8 GHz Band Wireless Communication for Japan ETC System

技術本部 森下慶一*1
 神戸造船所 前田孝士*2 大野秀和*2
 小西雅義*2

有料道路の自動料金収受を目指した ETC (Electronic Toll Collection) システムは、ITS (Intelligent Transport Systems) における早期実現可能なアプリケーションとして世界各国で盛んに研究開発が行われている。当社は料金機械分野のリーディングカンパニーとして国内への導入当初から開発に携わっており、ETC システムに関しても他社に先駆けて研究に着手している。既にシンガポールに ERP (Electronic Road Pricing) システムを、マレーシアに ETC システムを納入・稼働させており、車載器の納入実績では世界第 3 位の実績がある。現在、国内向け ETC システム無線機の試作評価が完了しており、海外での開発で培われた技術とノウハウをフルに応用展開し、要求仕様の通信エラー率 10^{-6} を達成する見通しを得た。

R&D on Electronic Toll Collection (ETC) that enables drivers to be registered and billed for tollgater automatically has been conducted worldwide as an Intelligent Transport Systems (ITS) application. As a leader in this field, we have developed a toll machine first introduced into Japan, and began studying ETC in 1984 prior to other companies. We have provided Electronic Road Pricing (ERP), to Singapore and an ETC to Malaysia, and are ranked among the top three in-vehicle unit suppliers. Trial development and testing has been completed for Japan's ETC, and predict achievement of the required communication error rate specification of 10^{-6} .

1. はじめに

ノンストップ料金収受 (Electronic Toll Collection : ETC) システムは、料金所における料金収受業務を無線通信により実現するもので、通行車両は料金所で一時停止の必要がなくなり、排気ガス及び発進加速騒音の低減など周囲環境の改善や燃料節約、料金所での渋滞緩和といった経済効果が見込まれるものである。本システムの導入では欧米が先行しているが、近年アジア地域での導入計画が活発化してきており、次世代料金収受機械としての導入が世界的動向となっている。当社では、1984 年から研究開発に着手し、マレーシア南北道に ETC システムを、シンガポールに市内への交通流入制限を行う道路課金 (Electronic Road Pricing : ERP) システムを導入した。

一方、国内でも ITS (Intelligent Transport Systems) の一環として建設省を中心に ETC システムへの取組が盛んに行われており、1998 年 3 月には日本道路公団を始めとする 4 公団から共通仕様書が公表された。これに基づき、自動車メーカー・電気メーカー・通信メーカー等が事業への参画をねらって試作機の開発に着手している。

本報では、システムの主要要素技術となる無線通信技術に関し、海外システムとの対比を踏まえながら、ETC システムにおける当社の開発状況について述べる。

2. ETC システム構成と基本機能

ETC システムは、料金所に設置された路側アンテナと車両に搭載された無線機器間の無線通信により料金を徴収することで、車両がノンストップ・キャッシュレスで通行可能となる。図 1 に示すように、路側機器は、無線通信用のアンテナ及びアンテナ制御装置、車線での車両の存在検知を行う車両検知装置、不正車両等

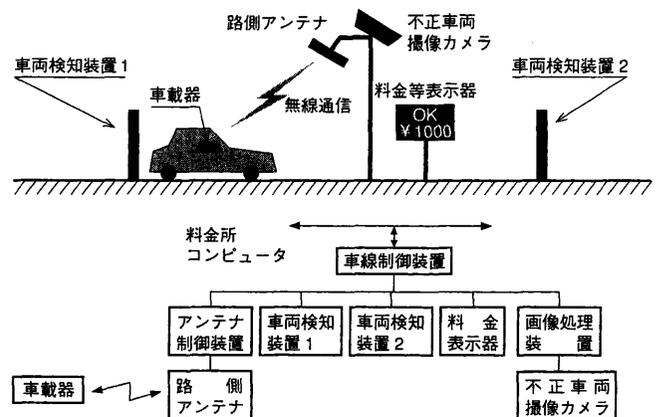


図 1 ETC システム構成例 料金所における ETC システムの構成例を示す。

Example of single lane ETC system configuration

の撮影を行う不正車両撮像カメラと画像処理装置及びこれらの機器を統制制御する車線制御装置等から構成される。一方、車両の機器は、無線機能を備えた車載器と、車載器に挿入して料金支払いを行う IC カードから成る。

基本的に、ETC システムは通常の料金所のように 1 車両ごとに逐次料金収受を行うシングルレーンシステムである。したがって、システムの導入に当たっては、既存の料金収受員が居る料金所に ETC 機器を追加設置する混在収受方式が主となり、ETC 以外の一般車両 (非 ETC 車両) が混在するため、ETC 車両と非 ETC 車両の識別等に高度なシステム技術が必要となる。

また、料金所でのシングルレーンシステム以外にも、ドライバにシステムへの近接を告知する予告アンテナを料金所近傍に設けたり、本線上を走行する車両のバリアチェックを行うマルチレー

*1 高砂研究所電子技術研究室
 *2 電子・宇宙技術部料金システム開発課

ンシステムの適用が考えられるなど、実用化された際には世界で最も大規模なシステムとなるであろう。

システムに要求される基本機能を以下に示す。

- 車両の進入検知及び無線通信の開始
- 車載器との無線通信による料金収受
(入口料金所番号, 時刻等の読み書き及び料金収受)
- 徴収した金額の表示
- 車両の通過検知
- ETC 車両と非 ETC 車両の識別
- 通過車両が不正車両の場合のナンバプレート撮像

3. ETC 無線機への要求仕様

ETC システムでは無線通信で通行料金が課金されるため、無線技術がシステムの中核技術となる。携帯電話や PHS 等に代表される従来の無線通信では、連続的なサービスを提供するために通信領域は面的に形成されている。これに対し、ETC システムでは通信距離が数 m~30 m のスポット的な間欠通信となる。しかし、最高 180 km/h の高速移動体と誤り率 10^{-6} 以下で通信するという極めて高い信頼性が要求される点で、従来の無線通信とは大きく様相を異にしている。

ETC システムに対する無線通信仕様は、(社)電波産業会 (ARIB) が公表した“有料道路自動料金収受システム標準規格”⁽¹⁾で標準化されている。この規格に基づき、日本道路公団、首都高速道路公団、阪神高速道路公団、本州四国連絡橋公団の 4 公団による共通仕様書の中で詳細に規定されている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。表 1 に当社が実用化したシンガポール ERP システムと対比した無線通信の

表 1 無線通信の主要諸元
Specification of wireless communication for ETC system

項目	仕様		
	国内 ETC システム		シンガポール ERP システム
	路側機	車載器	
送信周波数	5 795 及び 5 805 MHz	5 835 及び 5 845 MHz	2 402.5-2 440.0 MHz
放射電力 (EIRP)	10 mW (クラス 1) 300 mW (クラス 2)	10 mW	1 W
受信感度 (BER= 10^{-5})	-65 dBm (クラス 1) -75 dBm (クラス 2)	-60 dBm	-90 dBm (路側機) -35 dBm (車載器)
ビーム幅 (水平面/垂直面)	12 度~32 度以上 /32 度以上	60 度以上	18 度/25 度(路側機) 60 度以上(車載器)
アンテナゲイン	20 dBi 以下	10 dBi 以下	15 dBi
通信方式	トランシーバ式 (アクティブ)		トランスポンダ式 (パッシブ)
設定最大車速	80 km/h (料金所レーン) 180 km/h (本線)		120 km/h
通信エラー率	10^{-6}		10^{-5}
通信領域	普通車: 4 m, 大型車: 3 m (料金所レーン) 普通車: 10 m, 大型車: 8 m (本線) 20~30 m (予告)		普通車: 4.5 m 大型車: 3.5 m
変調信号速度	1 Mbps		750 kbps/1 Mbps
変調方式 (アップ/ダウン)	振幅変調/振幅変調		位相変調/振幅変調
チャンネル数	2 ch		16 ch
偏波面	円偏波		円偏波
誤り検出方式	CRC-16		CRC-32
誤り訂正方式	—		ハーグレバーガ
アクセス方式	TDMA-スロットアロハ		TDMA-スロットアロハ

(注) クラス 1: 料金所レーン及び本線用
クラス 2: 予告用

主要諸元を示す。ETC システムが ERP システムと大きく異なる点は、通信方式と周波数帯である。ERP システムは路上側からの電波を反射し、車載器に発振器を持たないパッシブ型のトランスポンダ式であるのに対し、ETC システムは通常の携帯電話と同様、車載器に発振器を備えたアクティブ型のトランシーバ式となっている。また、ETC の周波数は 5.8 GHz 帯であり、ERP の 2.4 GHz 帯に対し 2 倍以上高くなっている。さらに、最大車速は 180 km/h と ERP の 1.5 倍であるが、通信エラー率は 1 けた低い 10^{-6} となっており、極めて高い通信信頼性が要求されている。しかし、当社は回線マージンの不利なトランスポンダ式の ERP システムで、延べ台数 480 万台にも達する実車両を用いた走行試験を行っており、世界でも類のない極めて過酷な走行試験でエラー率 10^{-6} を実現し、自動料金収受システムの中核となる無線技術が確立済みであることを世界に向けて実証した⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

4. 試作機の開発と特性評価試験

ETC システムと ERP システムとを慎重に比較検討し、両システムでの相違性が高い項目を中心に試作機の開発を実施した。第一は、トランシーバ式の通信方式と 5.8 GHz への高周波化である。トランシーバ式の通信方式に対応するため、車載器用に発振器を内蔵したマイクロ波ハイブリッドモジュールを開発した。これにより、回路機能を集約させるとともに、小型化による高周波化への対応を容易にした。第二は、通信信頼性を決定する通信領域の形成である。表 1 より、車載器のアンテナ指向性 (ビーム幅) は 60 度以上とブロードであるため、通信領域は路側機のアンテナ指向性が支配的となる。したがって、適切な通信領域を形成するには、路側アンテナの指向性を決定するためのアンテナ設計技術と電波伝搬技術が重要となる。

以下、開発の中心項目である車載器用マイクロ波ハイブリッドモジュール、路側アンテナについて詳述する。

4.1 マイクロ波ハイブリッドモジュール

車載器用に開発したマイクロ波ハイブリッドモジュールは 5.8 GHz 帯のトランシーバ式の通信方式に対応したものであり、発振器、増幅器、変調器等を内蔵している (図 2 参照)。図 3 のブロック図に示すように、5.8 GHz の電波となる CW (Carrier Wave) 信号は PLL (Phase Locked Loop) 発振器で生成され、外部から入力される送信データにより MOD (Modulator) ブロックで ASK (Amplitude Shift Keying) 変調される。変調信号は後段の PA

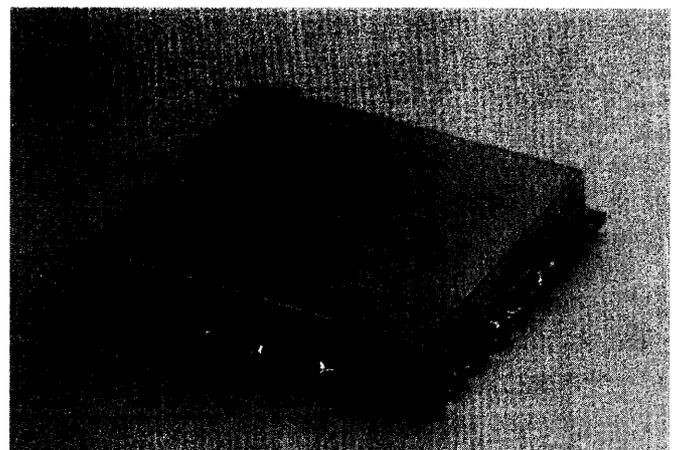


図 2 試作ハイブリッドモジュール 試作したハイブリッドモジュールの外観を示す。30×25×5 mm の小型化を実現。
Top view of microwave hybrid module

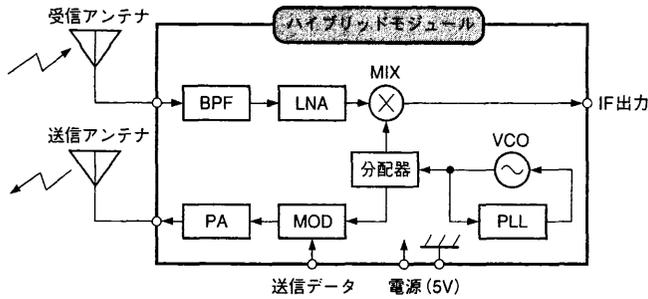


図3 ハイブリッドモジュールのブロック図 試作したハイブリッドモジュールの内部構成を示す。
Block diagram of microwave hybrid module

(Power Amplifier) で電力増幅され、10 mW の信号が送信アンテナから路側器に放射される。

一方、受信アンテナで受信した路側器からの信号は、ハイブリッドモジュールのフロントエンドにある BPF (Band Pass Filter) で不要周波数帯の信号を除去した後、次段の LNA (Low Noise Amplifier) で所要レベルに増幅される。さらに、MIX (Mixer) で 40 MHz に周波数変換された IF (Intermediate Frequency) 信号が出力され、モジュール後段の検波器で復調される。

したがって、ハイブリッドモジュールには、トランシーバ式の無線機に必要なすべての高周波回路群が単体部品として1つのパッケージに収まっており、取扱いが非常に容易になっている。

ハイブリッドモジュールの動作特性の一例として、モジュールを組み込んだ車載器の感度特性を図4に示す。受信感度はビット誤り率 (BER : Bit Error Ratio) 10^{-5} を満足する受信電力で定義されており、要求仕様感度 -60 dBm に対して実測感度 -71 dBm と、約 10 dB 良い特性が得られた。この結果は、発振信号の純度、送受信間の分離度、アンプの低雑音性等、回路特性が良好であることを示している。

システム内干渉を防止するために、ETC には 2 種類の周波数の組合せが割当てられている (表1参照)。車載器が応答する周波数は路側機器が指定するため、車載器は通信領域に進入するまで周波数を確定することができない。したがって、路側機器の指令に基づいて発振周波数を可変する機能が車載器に要求される。前述したように、発振ブロックは PLL シンセサイザとなっており、シンセサイザ内部の分周比を変えることで容易に発振周波数の変更が可能である。さらに、シンセサイザの応答性を決定するループフィルタを最適化しており、100 μ s の高速切替えを実現している。料金所レーンでの通信領域は大型車でわずか 3 m であり (表1参照)、高速で領域を通過すると通信可能な時間が限定されることになる。したがって、周波数切替えに要する時間が長いと、通信時間に与える影響が大きくなり、通信信頼性が劣化することになる。開発したハイブリッドモジュールは 100 μ s の超高速で周波数を切替えるため、車載器は通信領域に進入した瞬間に周波数を確定することができる。このため、車両が高速で走行した場合でも十分な通信時間が確保され、高い通信信頼性を実現することが可能である。

ハイブリッドモジュールの寸法は 30×25×5 mm となっており、従来の個別素子による回路寸法に比べて約 1/3 に小型化されている。さらに、複数のモジュールをハイブリッド化することで取扱いの難しいマイクロ波回路群を単体部品として取扱うことが可能となり、部品数の削減による素子価格の低減以外にも組立や調整等に要する費用もコストダウンされ、全体で約 50 % の低コスト

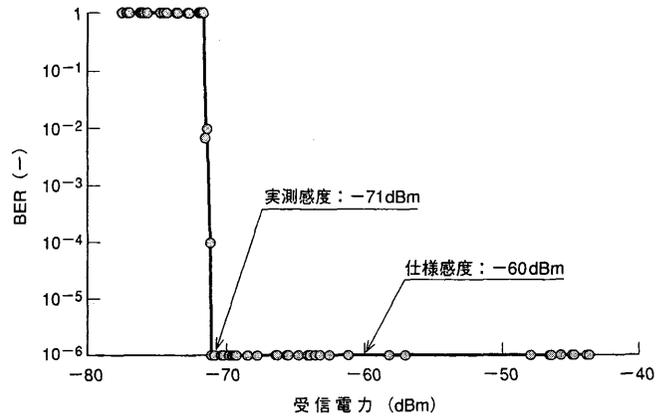


図4 試作機の感度特性 ハイブリッドモジュールを組み込んだ車載器の感度特性を示す。要求仕様感度 -60 dBm に対し、10 dB 良い結果を得た。
Sensitivity characteristics of on-board unit

表2 ハイブリッドモジュールの主要諸元
Specification of microwave hybrid module

項目	性能	備考
送信周波数	5 835 MHz 及び 5845 MHz	
受信周波数	5 795 MHz 及び 5805 MHz	
送信出力	10 mW	
受信感度	-70 dBm 以下	BER=10 ⁻⁵
消費電流	150 mA	電源電圧: 5 V DC
寸法	30×25×5 mm	
動作温度・湿度	-20~85°C, 50~95 % RH	

ト化が可能であると試算している。表2に開発したハイブリッドモジュールの主要諸元を示す。

4.2 路側アンテナ

路側アンテナは、シンガポール ERP システムと同様、マイクロストリップアンテナ素子をアレイ状に配した構成としている。このマイクロストリップアレイアンテナは、各アレイ素子に入射される電波信号の振幅と位相を操作すると、比較的容易に任意の指向性を形成することが可能である。また、通常のプロット基板と同様の工程で製造されるため、特性の安定性と低コスト製造に優れている。

当社では、ERP システムのアンテナを設計する際に独自のアンテナ設計ツールと電波伝搬解析ツールを開発しており、今回の ETC システム用路側アンテナの設計でもこれらのツールを活用した。図5に試作したアンテナの外観を示す。アンテナ表面は 7×9 素子のパッチアンテナがアレイ状に配列されており、裏面には各アレイの振幅・位相を制御するフィードネットワークが配してある。また、路側アンテナ小型化のために、送受信が可能な共用型のアンテナとなっている。

このアンテナを用い、当社二見工場に建設した ETC システム検証用料金テストコースで実車測定を実施した。図6に試作アンテナからの放射電波を車載器で受信した電力プロファイルと、ビット誤り率の結果を示す。図中、実線が受信電力の実測値を、点線が理論値を表している。安定通信領域の外では受信電力が非常に小さく、測定器の内部雑音以下となっているために両者に違いが見られるが、システム上重要な安定通信領域では実測値と理論値は非常に良く一致している。また、車両進行位置 0 ~ -3 m の通信領域内の受信電力は通信領域境界の受信電力に対して約 20 dB 大きく、高いマージンが確保されている。さらに、安定通信領域中

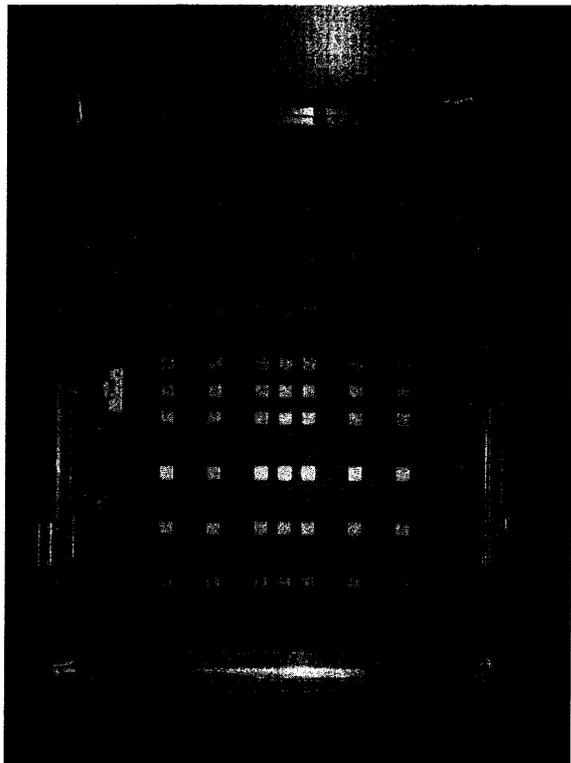


図5 路側機のアンテナ構成 所定の通信領域を形成するマイクロストリップアレイアンテナの構成を示す。
Configuration of microstrip array antenna for road side equipment

の受信電力変動は2 dB以下に収まっており、電波の伝搬特性が非常に安定していることを示している。これは、放射電波がアンテナのメインローブに集中し、直接伝搬路以外からの反射によるフェージングの影響が低減されているためである。

図6には、データ伝送試験のBER測定結果も破線で示している。BERは受信電力と完全に対応しており、車載器の受信感度(-71 dBm)以上の電力を受信するとBERは 10^{-5} 以下となっている。したがって、受信電力が-71 dBm以上となる0.5 m~4 mの車両位置では伝送品質の劣化もなく、BER 10^{-5} 以下の安定な通信領域が形成されている。

また、アンテナ指向性の最適化により通信領域の境界では受信電力の傾きが急しゅんとなっており、わずか50 cm移動するとBER = 10^{-5} のエラーフリー状態からすべて通信不能となるBER = 1の状態まで急激に変化している。このように、通信可能な領域と通信不能領域が近接しているため通信領域の境界が明確であり、領域の変動が極めて小さくなる。したがって、十分長く安定した通信領域が確保されるため、高い通信信頼性を実現することが可能である。

以上、開発したアンテナによる電波伝搬試験及びデータ伝送試験を実施した結果、目標どおりに安定した通信領域が形成されていることを確認した。これにより、アンテナ設計ツールと電波伝

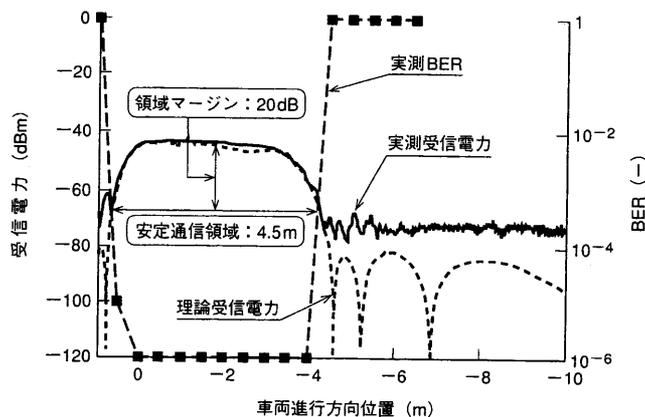


図6 車載器の受信電力プロファイル 車載器受信電力の実測結果と設計値は非常に良く一致しており、設定した通信領域内では極めて信頼性が高い。
Receiving power profile of on-board unit

搬解析ツールに基づく設計手法の有効性を検証し、要求仕様である通信エラー率 10^{-6} を実現できるめどが得られた。

5. 今後の展開

シンガポールERPシステムの開発で培った技術とノウハウをフルに活用し、国内ETCシステムに供する車載器用マイクロ波ハイブリッドモジュールと路側アンテナを開発の中心テーマに無線システムを試作した。この結果、モジュールのハイブリッド化により1/3の小型化、50%のコスト低減が可能になった。

また、路側アンテナの指向性を最適設計することで、20 dBのマージンを持つ安定した通信領域が形成され、通信エラー率 10^{-6} を達成するめどが得られた。

今後、テストコースでのフィールド試験を積重ね、上記アンテナの評価を深める予定である。また、製品化に向けては、今回ハイブリッド化したモジュールをモノリシック化するMMIC (Microwave Monolithic IC)の開発も計画しており、IF段以降のモジュール化と併せて一層の小型・低コスト化を推進していく予定である。

参考文献

- (1) (社)電波産業会, 有料道路自動料金収受システム標準規格 ARIB STD-T 55.10 (1997)
- (2) 日本道路公団ほか, ETCプロトコル規格書(狭域無線) ETC-B 98220 P (1998)
- (3) 日本道路公団ほか, ETC路側無線装置仕様書 ETC-A 98200 P (1998)
- (4) 日本道路公団ほか, ETC車載器仕様書 ETC-A 98210 P (1998)
- (5) 森下慶一ほか, ETCシステムと通信技術, 電気学会電子・情報・システム部門大会 (1998) p.366
- (6) 村越英之ほか, ノンストップ料金収受システムの開発, 三菱重工技報 Vol.34 No.6 (1997) p.413
- (7) 橋本英喜ほか, シンガポールにおけるマルチレーン電子式道路課金システム, 三菱重工技報 Vol.36 No.1 (1999)