

RF トランシーバーを使って ETCの路側機用モジュールを 構成する

著者 : Tairan Sun、プロダクト・アプリケーション・エンジニア
 Bill Wang、システム・アプリケーション・エンジニア
 Shawn Liu、アプリケーション・エンジニア
 Aaron He、システム・アプリケーション・エンジニア

はじめに

2019年、中国ではETC（Electronic Toll Collection：電子料金収受）が爆発的に普及しました。政府が普及を後押ししたことにより、ETCの車載器（OBU：On-board Unit）を搭載した車両は、わずか1年の間に8000万台から2億台にまで増加しました。それを受けて、ETCは高速道路だけでなく、都市部においても駐車場の料金の徴収や車両の情報の収集といった用途にも利用されるようになりました。現在、駐車場の料金の徴収や車両の情報の収集を担うシステムは、カメラをベースとして構成されています。そのため、都市部で使われるETCアプリケーションについては、カメラをベースとするシステムにETCの路側機（RSU：Roadside Unit）を組み込むようにすることが望まれます。本稿では、アナログ・デバイセズのRFトランシーバー「[AD9361](#)」を使用して、ETC向けのRSUモジュールを実装する方法を紹介します。ターゲットとするアプリケーションは、中国のETCです。したがって、そのRSUモジュールは、中国の規格であるGB/T 20851-2019（Electronic Toll Collection – Dedicated Short Range Communication）¹に準拠します。また、11cm×6cmとかなりコンパクトなので、カメラをベースとするシステムに容易に組み込みます。加えて、このRSUモジュールは、シンプルなRF計測器として構成することも可能です。そうすると、RSUモジュールの製造ラインにおいて、同モジュールのテストに使用する計測器として役立てることができそうです。つまり、製造ライン用に高価なRF計測器を購入する必要がありません。したがって、コストを大幅に削減できます。

規格の概要

GB/T 20851-2019では、ETC向けRSUの物理層に関する要件を定めています。その概要を表1、表2にまとめました。

表1. RSUのダウンリンク用物理層の主要な要件

パラメータ	説明	
キャリア周波数	チャンネル1：5830MHz チャンネル2：5840MHz	
占有帯域幅（OBW）	5MHz以下	
周波数の許容誤差	$\pm 10 \times 10^{-6}$	
EIRP	33dBm以下	
不要輻射	30MHz～1GHz	-36dBm/100kHz以下
	2400MHz～2483.5MHz	-40dBm/1MHz以下
	3400MHz～3530MHz	-40dBm/1MHz以下
	5725MHz～5850MHz*	-33dBm/100kHz以下
	その他の周波数：1GHz～20GHz	-30dBm/1MHz以下
隣接チャンネル漏れ率	-30dB以下	
変調方式	ASK	
変調度	70%～90%	
データ符号化方式	FMO	
ビット・レート	256kbps	
ビット・レート精度	$\pm 100 \times 10^{-6}$	

* キャリア周波数からの距離がキャリア帯域幅の2.5倍

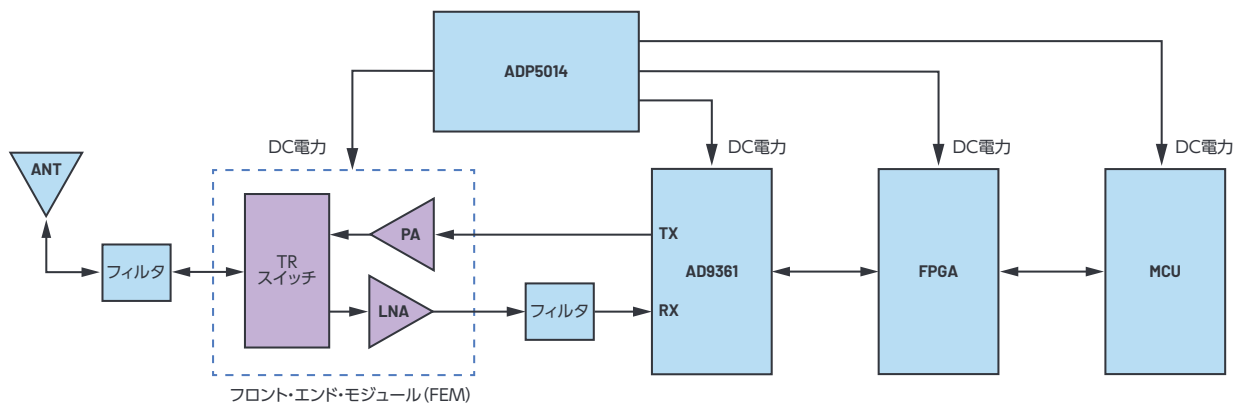


図1. RSUモジュールのブロック図

表2. RSUのアップリンク用物理層の主要な要件

パラメータ	説明	
キャリア周波数	チャンネル1：5790MHz チャンネル2：5800MHz	
周波数の許容誤差	$\pm 200 \times 10^{-6}$	
レシーバーの感度	-70dBm以下	
最大入力電力	-20dBm以上	
同一チャンネル 干渉除去比	10dB未満	
隣接チャンネル 干渉除去比	-20dB未満	
ブロッキング 除去比	-30dB未満	
受信帯域幅	チャンネル1	チャンネル2
	最大：5787.5MHz～ 5792.5MHz 最小：5788.5MHz～ 5791.5MHz	最大：5797.5MHz～ 5802.5MHz 最小：5799.5MHz～ 5801.5MHz
変調方式	ASK	
変調度	70%～90%	
データ符号化方式	FM0	
ビット・レート	512kbps	
ビット・レート精度	$\pm 1000 \times 10^{-6}$	

AD9361 をベースとする RSU モジュール

図1に、AD9361をベースとして構成したETC向けRSUモジュールのブロック図を示しました。図2に示したのは、これを実装したボードの概観です。

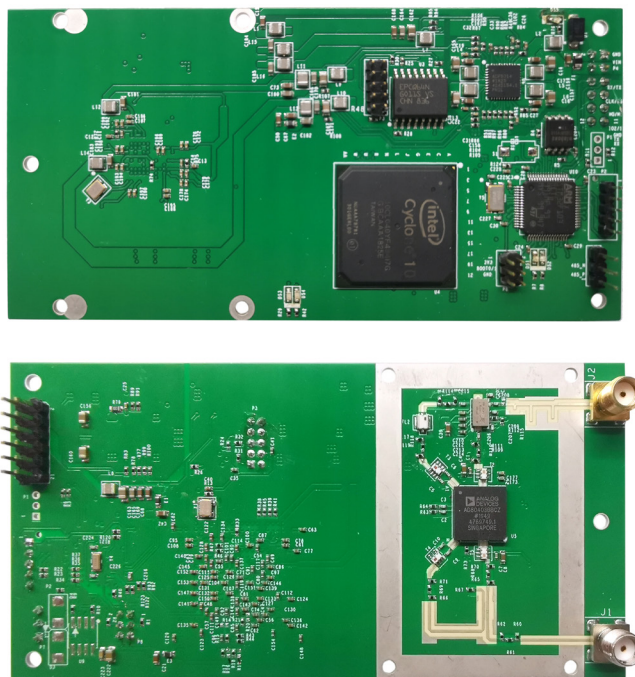


図2. RSUモジュールのボード

AD9361は、多様なアプリケーション向けに構成することが可能なトランシーバーICです。あらゆるトランシーバー機能を提供するために必要なRFブロック、ミックスド・シグナル・ブロック、デジタル・ブロックをすべて集積しています。

以下では、ETCシステムで使用するRSUアプリケーションにおいて非常に有用なAD9361の機能を紹介します。

まず、AD9361は、送信パスと受信パスの両方にプログラマブルな多相FIR (Finite Impulse Response) フィルタを搭載しています。このことは、デジタル領域のすべてのフィルタ処理は、FPGAを使うことなくAD9361の内部で実行できるということの意味します。そのため、リソース量が非常に少ない低コストのFPGAを選択することができます。また、例えば受信帯域幅の要件を満たしたいといった場合には、アナログ・デバイスが提供する[フィルタ・ウィザード](#)・ツールを利用できます。同ツールを使用してFIRフィルタの応答を調整し、得られたフィルタ係数をAD9361にダウンロードするといったことが可能です。

また、AD9361は、DCXO (Digital Controlled Crystal Oscillator) 機能を備えています。AD9361は、外付けの水晶発振器と組み合わせて使用するコンデンサを内蔵しています。このコンデンサをチューニングすることで、外付けの水晶発振器の周波数を非常に正確に制御することができます。一般的な実装では、RFに対応するPLLのN分周器を調整することで、RF周波数の許容誤差の要件を満たします。しかし、ビット・レート精度の要件を満たすかどうかは、水晶発振器の性能に依存します。しかも、通常はその性能を調整することはできません。それに対し、AD9361のDCXO機能を使えば、水晶発振器の発振周波数を調整することが可能です。それにより、ビット・レート精度と周波数の許容誤差の要件を同時に満たすことができます。また、RSUモジュールが動作温度範囲内で常に周波数の許容誤差とビット・レート精度の要件を満たすことを保証するために、水晶発振器の発振周波数の温度ドリフトを補償するために使用するルックアップ・テーブルを作成することが可能です。

加えて、AD9361は、レシーバー用のAGC (Automatic Gain Control) 機能を備えています。低速AGCと高速AGCの2つのモードが用意されており、自動的にゲインが制御されます。つまり、レシーバーのゲインを制御するための機能をFPGAで実装する必要はありません。高速AGCモードは、ETC向けのRSUアプリケーションにおいて非常に有効に機能します。アップリンクのパイロット信号が数個到達したら、それらの開始シンボルを使ってゲインを安定して調整できるよう設計されています。

送信パスでは、FPGAからAD9361にトランスミッタのデジタル・ベースバンド信号が引き渡されます。AD9361の内部では、デジタル・ベースバンド信号に対してフィルタリングが施され、

10.24MSPSから163.84MSPSへの補間処理が行われます。次に、D/Aコンバータ (DAC) によってデジタル・ベースバンド信号がアナログ・ベースバンド信号に変換され、その後にローパス・フィルタ (LPF) が適用されます。続いて、チャンネル1では5.83GHz、チャンネル2では5.84GHzのRF信号へのアップ・コンバージョンが実施されます。AD9361では、トランスミッタのRF部分にアッテネータが用意されています。それにより、トランスミッタの出力電力を80dB以上の範囲で制御することが可能です。なお、このアッテネータは、トランスミッタのリンク全体におけるゲインの温度補償を実施するためにも使用できます。続いて、トランスミッタの信号は、フロント・エンド・モジュール (FEM) 内のパワー・アンプ (PA) に送られて更に増幅されます。その後、マイクロストリップで構成されたLPFを通過します。LPFでは、トランスミッタの不要輻射 (spurious emission) の要件を満たすために高調波が除去されます。最後に、信号はアンテナに供給されます。図1のRSUモジュールでは、AD9361のトランスミッタにおいて減衰量を8dBに設定した場合、アンテナ・ポートにおいて最大29dBmの出力電力が得られます。AD9361の減衰機能は、高温時のゲインの減少と低温時のゲインの増大の両方を補償できるだけの十分なダイナミック・レンジを備えています。

一方、受信パスでは、アンテナからのRF信号がLPFを経て、FEM内部の低ノイズ・アンプ (LNA) に引き渡されます。続いて、バンドパス・フィルタ (BPF) を通過する際に帯域外の干渉信号が除去されます。受信パス内で更に増幅が行われ、アナログ・ベースバンド信号へのダウン・コンバージョンが実施されます。アナログ・ベースバンド信号はLPFを通過した後、A/Dコンバータ (ADC) によってデジタル・ベースバンド信号に変換されます。デジタル領域では、受信帯域幅の要件を満たすように信号にフィルタリングが施され、163.84MSPSから10.24MSPSへのデシメーションが行われます。最後に、AD9361からFPGAに信号が引き渡されます。

最後に、電源ソリューションについて触れておきます。図1のRSUモジュールへの入力電圧は5Vです。各回路ブロックの給電には「[ADP5014](#)」を使用しています。同製品は、高性能、低ノイズの降圧レギュレータを4つ集積しています。それぞれによって、5Vから3.3V、2.5V、1.8V、1.3Vへの変換を実施します。5Vの入力電圧とADP5014により、FEM、AD9361、FPGA、マイクロコントローラ (MCU) 向けの4種の電源電圧が生成されます。

トランスミッタの評価結果

まず、AD9361を用いて構成したRSUモジュールのトランスミッタについて、規格で定められているすべてのテスト・ケースに即して評価を実施しました。その結果、このRSUモジュールは、かなりのマージンを確保した状態で規格を満足できることが確認されました。図3～図6に、いくつかの主要なテスト・ケースに関するスクリーン・ショットを示しておきます。

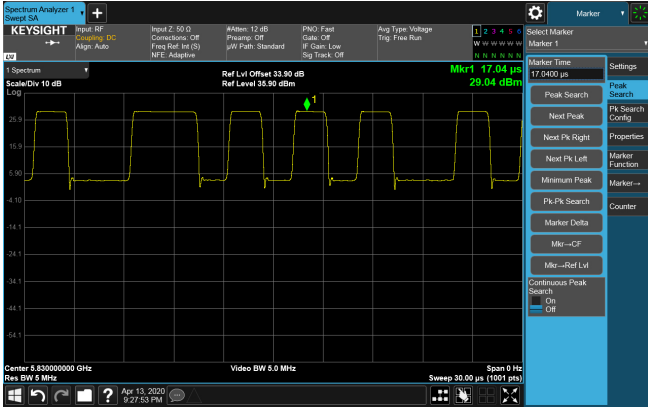


図3. 29dBmの出力電力

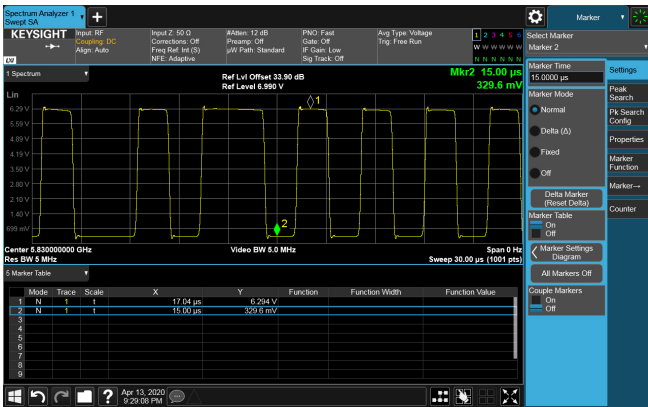


図4. 90%の変調度

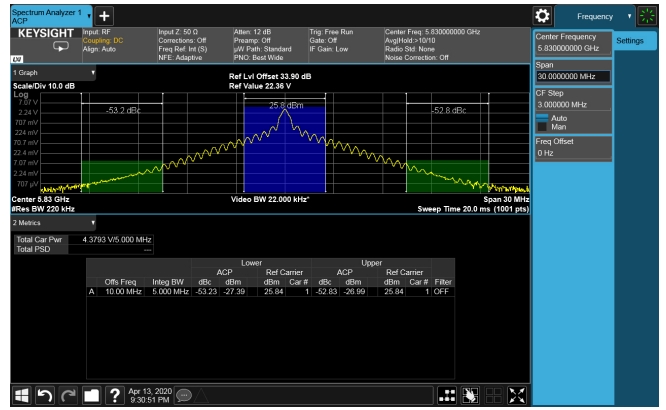


図5. -50dBcのACLR（隣接チャンネル漏洩電力比）

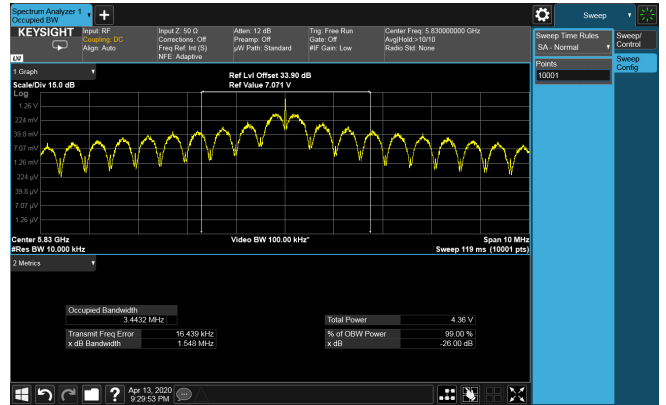


図6. 3.4MHzの占有帯域幅

レシーバーの評価結果

次に、AD9361をベースとして構成したRSUモジュールのレシーバーについて、規格で定められているすべてのテスト・ケースに即して評価を実施しました。その結果、このRSUモジュールは、かなりのマージンを確保した状態で規格を満足できることが確認されました。レシーバーの感度については、符号化方式としてFMO、変調方式としてASKを適用したデータを信号発生器にダウンロードして評価を実施しました。復号化用のアルゴリズムはFPGAに実装しました。

RSUモジュールのレシーバーの感度は-95dBmであり、要件である-70dBmを大きく上回っています。図7は、-95dBmの入力信号に対するI/QデータのFFT結果とI/Qデータの振幅を示したものです。入力信号が-95dBmのレベルであっても、S/N比はかなり良好であることがわかります。

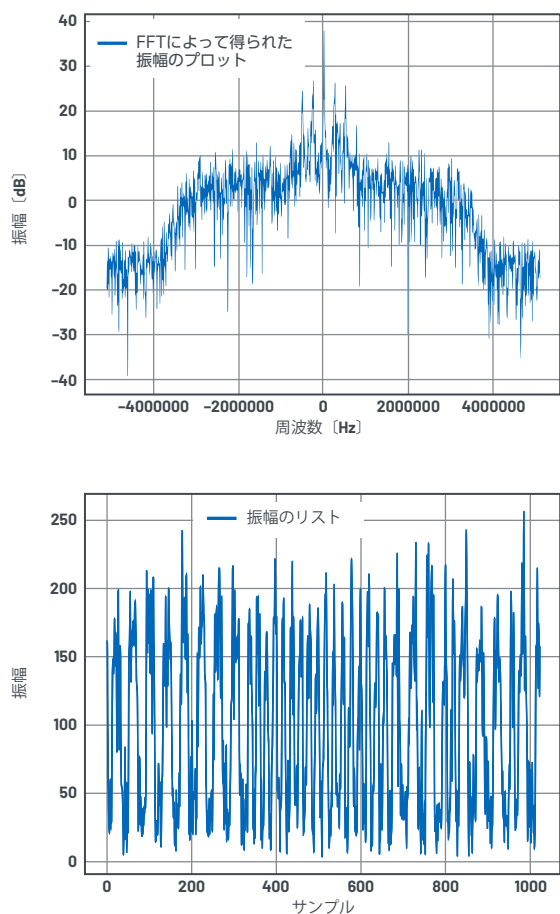


図7. -95dBmの入力信号に対する応答。
(上) はI/QデータのFFT結果、
(下) はI/Qデータの振幅をプロットしたものです。

最大入力電力、受信帯域幅、同一チャンネル干渉除去、隣接チャンネル干渉除去、ブロッキング除去など、このRSUモジュールはすべての規格を満たしています。

シンプルなRF計測器

このRSUモジュールは、シンプルなRF計測器として構成することができます。そのように構成したRSUモジュールは、お客様の製造ラインにおいて、RSUモジュールやアンテナ・モジュールのテストに利用することが可能です。

AD9361は、2つのRFチャンネルを備えています。それらのうち1つは、ETC向けのRSUモジュールを実装するために使用します。もう一方のチャンネルは、オンボードの高指向性マイクロストリップ・カプラと共に、リターン損失のテストに使用されます。

モジュールのトランスミッタのテストでは、AD9361のRSSI (Receive Signal Strength Indicator) 機能を利用します。この機能は、キャリブレーション後に0.25dBの精度を達成します。そのため、ETC向けRSUモジュールの出力電力のテストに十分に使用できます。

モジュールのレシーバーのテストに向けては、AD9361の出力電力を1つまたは2つの電力レベルでキャリブレーションすることができます。AD9361が備えるアッテネータを使用することにより、レシーバーのテストに向けて、広い範囲にわたる出力電力を正確に供給することが可能になります。

まとめ

AD9361を採用すれば、ETC向けRSUモジュールをコンパクトに設計することができます。アナログ・デバイスでは、同モジュールの完全なリファレンス設計を提供しています。そのリファレンス設計には、ハードウェアだけでなく、ファームウェアも含まれています。このRSUモジュールは、カメラをベースとするシステムに簡単に組み込むことができます。それだけでなく、ETC向けの標準のRSUモジュールとして単体で使用することも可能です。また、このモジュールは、GB/T 20851-2019規格が定めるすべての要件を満たしています。加えて、シンプルなRF計測器として構成することも可能です。そのように構成すれば、お客様の製造ラインで計測器として使用することができます。

参考資料

¹ GB/T 20851-2019 [Electronic Toll Collection -- Dedicated Short Range Communication (ETC -- 専用短距離通信)]

著者について

Tairan Sun (tairan.sun@analog.com) は、アナログ・デバイス (上海) のプロダクト・アプリケーション・エンジニアです。2017年にスタッフ・プロダクト・アプリケーション・エンジニアとして入社しました。それ以前は、DJIでアルゴリズム・エンジニア、ZTEでアーキテクチャ・エンジニアを務めていました。2009年に合肥工業大学で電子工学／情報工学の学士号を取得。2012年には上海交通大学で回路／システムに関する理学修士号を取得しています。

Bill Wang (bill.wang@analog.com) は、アナログ・デバイス (北京) のシステム・アプリケーション・エンジニアです。2017年に入社しました。2014年に広州大学で光学情報科学／技術に関する理学学士号、2017年に華中科技大学で光電子検出技術に関する理学修士号を取得しています。

Shawn Liu (shawn.liu@analog.com) は、アナログ・デバイスのアプリケーション・エンジニアです。2019年に入社しました。広帯域対応のRFトランシーバー製品を担当する中央アプリケーション・センター・チームに所属しています。2015年に天津科技大学で理学学士号、2019年に天津大学で理学修士号を取得しています。

Aaron He (aaron.he@analog.com) は、アナログ・デバイス (上海) のシステム・アプリケーション・エンジニアです。2017年に入社しました。その前は、シニアRFエンジニアとしてEricssonに勤務。10年以上にわたり、無線通信基地局の設計、統合、製品用のテスト・システムの開発に従事しました。2001年に西安交通大学で通信工学の学士号、2006年に華中科技大学でマイクロ波工学の修士号を取得しています。

EngineerZone®

オンライン・サポート・コミュニティ

アナログ・デバイスのオンライン・サポート・コミュニティに参加すれば、各種の分野を専門とする技術者との連携を図ることができます。難易度の高い設計上の問題について問い合わせを行ったり、FAQを参照したり、ディスカッションに参加したりすることが可能です。



Visit ez.analog.com

* 英語版技術記事は [こちら](#) よりご覧いただけます。