デジタル通信用低消費電力IQ変調器

Bruce Hemp、Sunny Hsiao 共著 PDFをダウンロード

IQ変調器は、RFシステム用の汎用性を備えたビルディング・ブロックです。 最も一般的なアプリケーションは、デジタル通信システム用RF信号の生成 です。本稿では、LTC5599低消費電力IQ変調器の変調精度について解説し、 このデバイスをデジタル通信システムに組み込む方法を簡単な例で示します。

図1. 基本変調精度を測定するためのテスト・セットアップ



変調器アプリケーション IQ変調では、変調装置の中心周波数、帯 域幅、および精度能力の範囲内で、ほぼ あらゆるタイプのRF変調を行うことがで きます。表1に、LTC5599のアプリケー ションをいくつか示します。

表1.LTC5599低消費電力IQ変調器のアプリケーション例

アプリケーション	変調規格	変調タイプ ^(参考資料1)	最大RF BW	
デジタル・ワイヤレス・ マイクロフォン	独自	QPSK、16/32/64-DAPSK、 Star-QAM	200kHz	
ワイヤレス・ネットワーキング ・ホワイトスペース無線 ・コグニティブ無線	802.11af	OFDM : BPSK、QPSK、 16/64/256-QAM	最大4個の6MHzチャンネル	
CATV アップストリーム	DOCSIS	16-QAM	6MHz	
防衛用無線(携帯型、可搬型)				
ソフトウェア無線 (SDR)	カスタム	広いプログラマビリティ範囲	—	
携帯型試験装置				
アナログ変調	—	AM、FM/PM、SSB、DSB-SC	—	
双方向無線 ・民生用 ・産業用 ・公共安全用	TETRA	π/4-DQPSK、π/8-D8PSK、 4/16/64-QAM	25kHz~150kHz	
	TETRAPOL	GMSK	10kHz、12.5kHz	
	P-25	C4FM、CQPSK	6.25kHz~12.5kHz	
	DMR	4FSK	6.25kHz、12.5kHz	

図2. 実験室グレードのベースバンドおよび LO シグナル・ジェネレータを使用して測定した LTC5599のEVM。MERは49dBを超えており、 基本的に「放送品質」です。

変調精度とEVM

エラー・ベクトル振幅 (EVM) は、デジ タル無線通信システムにおける変調精度 の尺度です。変調信号に何らかのエラー があると受信が難しくなったり過度の帯 域幅を占有したりする原因となるので、 変調精度は重要です。これをチェックし ないままにすると、レシーバーの過度の ビット・エラー発生、有効レシーバー感 度の低下、あるいは送信隣接チャンネル 電力 (ACP)の増大などを招く可能性が あります。

エラー・ベクトルは、実際の受信または 送信シンボルと理想的なリファレンス・ シンボルの差を示すI-Q平面内のベクト ルです。EVMは、エラー・ベクトル電力 と平均理想リファレンス・シンボル・ベ クトル電力の比です。多くの場合、これ はdBまたはパーセンテージで表されま す。

図1は、LTC5599低消費電力直接直交 変調器で実現可能な変調精度を知るため のテスト・セットアップの例です。図2 に結果を示します。このテストでは、高 精度の実験室用装置が、30kシンボル/ 秒の16-QAMベースバンド(120kbps) と変調器への450MHz LO入力信号を生 成します。変調器出力はベクトル・シグ ナル・アナライザ(VSA)で調べます。

図2において、「EVMと時間の関係 (EVM VS TIME)」欄はすべてのシンボルを通 じてEVMが一様に低いことを示してお り、「エラー概要 (ERROR SUMJARY)」 欄は、EVMがRMS値で約0.24%、ピー ク値で約0.6%であることを示していま す。これは非常に優れた性能であり、 49.6dBという変調誤差比 (MER) がそ れを裏付けています。

LTC5599は、IとQのDCオフセット、 振幅アンバランス、直交位相アンバラン



図1に示すテスト回路 DUT:LTC5599 レジスタ[[0…8] = [0X31, 84, 80, 80, 80, 10, 50, 06, 00] 周波数を450MHzに設定、その他はすべてデフォルト VSA:AGILENT 89441A、解析スパン=100kHz 測定フィルタ:ルート・コサイン・アルファ0.35 リファレンス・フィルタ:レイズド・コサイン



スの精密調整を容易にするトリム・レジ スタを内蔵しており、変調精度をさらに 高めることができます。つまり、トリム・ レジスタの調整を行うことでさらに良好 な結果が得られます。

DFB

ODULATIO

OCCUPIED BW = 40.5kHz

8-BIT

Q

このテストは、最良条件下でのこの変調 器の能力が最適化を行わなくても優れ たものであることを、多くの面で実証し ています。ベースバンド帯域幅は広く、 DAC精度と分解能は非常に優れており、

RF OUT

-4 dBm RMS

LTC5599

LOW POWER

IQ MODULATOR

0

5th ORDER BESSEL

FULL SCHEMATIC IN FIGURE 4

デジタル・フィルタリングはほぼ理想的 です¹。これらのテスト結果は変調器の真 の性能を測定するのに有効ですが、以下 に述べるように、実用的な低消費電力ワ イヤレス実装にはある程度の妥協が必要 です。

プログラマブル・ロジックまたは FPGAからの駆動

多くのFPGAやプログラマブル・デバ イスは、デジタル・フィルタ・ブロッ ク (DFB) 機能をサポートしています。 これはデジタル通信に不可欠なビルディ ング・ブロックです。未加工の送信デー タは、そのまますぐにIQマッピングと デジタル・フィルタリングが可能です。 LTC5599のようなIQ変調器の駆動に Cypress PSoC 5LPなどのデバイスを利 用する方法の一例を、図3に示します。





SPI BUS SETS MODULATOR CENTER FREQUENCY

MCU WITH PROGRAMMABLE LOGIC DFB DAC 8-BIT DFB DAC SINGLE ENDED DFC DFD DAC

TO DIFF

V_{OCM} = 1.4V

0

図3.送信エキサイタのブロック図(図4に全体回路図を示します)

design features

デジタル・インターポレーションを使っ てDACのクロック周波数を上げること で、DACのイメージ周波数を上げます。 これは、DACイメージを受け入れ得るレ ベルまで減衰させるLC再構成フィルタの フィルタ次数条件を緩和する一方で、位 相誤差と広帯域ノイズを最小限に抑えま す。

図4に全体の回路図を示します。 変調器 に対する差動ベースバンド駆動は、シ ングルエンド・ベースバンド駆動とは対 照的に、最も高いRF出力電力と最小の EMVを実現します。LTC6238低ノイ ズ・アンプ(U2)は、DACのシングル エンドI出力とQ出力を差動に変換しま す²。入力アンプU2のゲインは、フィル タ終端抵抗R_{L(1)}とR_{L(Q)}の2:1の減衰効果 を考慮に入れた上で、DACの出力電圧 範囲を変調器の入力電圧範囲にスケーリ ングするように設計されています。入力 アンプU2も、IQ変調器に必要な入力コ モンモード電圧を供給できるように設計 されています。これは、変調器の適切な DC動作点と直線性を維持する上で重要 です。

DAC再構成ローパル・フィルタ(LPF) の設計には、従来型のLCフィルタ合成法 を使用します。フィルタのシャント容量 の一部は、グラウンドへのコモンモード・ コンデンサとして実装されます。これは、 変調器出力に入り込む可能性のあるコモ ンモード・ノイズを減らすことにもなり ます。ここでアクティブ・フィルタを使 用する場合は、広帯域RFノイズ・フロア を最小限に抑えるために、変調器前の最 終フィルタ段をパッシブLCルーフィン グ・フィルタとする必要があります。

性能的な結果を表2、図5、図6に示しま す。このケースでは、EVMはベースバ ンド波形のデジタル精度によって制限さ れ、ここではU1 FIRフィルタのタップ数 (63) とDAC分解能(8ビット)によっ て決定されます。このため、表2に示す



図5. EVM測定の測定詳細。実験室グレードのシグナル・ジェネレータに代えて2個のICデバイスを使用。これは完全ではありませんが、通常は「十分」なものです。

ように、IQ変調器の問題点を調整によっ て解消した場合でも、EVMが大幅に改善 されることはありません。EVMを小さく するにはFIRフィルタのタップ数を増や して、より分解能の高いDACを使用しま す。

図2と図5に示された結果を比較すると、 グレードの高い実験室用ジェネレータを、 プログラマブル・ロジックとオペアンプ・ フィルタからなる回路に置き換えたこと による代償がわかります。EVMは0.24% RMSから0.8% RMSに増加しています。 このEVM増加は、主に、プログラマブ ル・ロジックICによって生成された波形 は実験室グレードの装置によるものほど 正確ではないという事実によるものです。 これは現実の実装に見られるケースです が、図5は非常に良好なアイ・ダイアグ ラムを示しており、概要欄の測定値は、 ほとんどのアプリケーションにとって変 調精度が十分なものであることを示して います。

図6からは、出力スペクトラムが極めて クリーンであることがわかります。必要 信号に対する相対的なDACイメージ・ スプリアスの振幅は、式sin(x)/xによっ て予測できます。ここで、x = π f/f_{CK}で、 DACのLC再構成フィルタによる減衰が これに加わります。隣接チャンネル電力 を最小限に抑えるには、低位相ノイズLO と同様に、長い(タップ数の多い)FIR フィルタが不可欠です。

表2. EVM性能。63タップのFIRフィルタ設計と8ビットのデュアルDACを使用した場合でも、0.8%のRMS EVMが実現されていればほとんどの アプリケーションにとって全く十分です。

TX FIRフィルタ設計	インターポレーション 係数	シンボル・レート (ksps)	データ・レート(ksps)	EVM (% RMS)	EVM(% ピーク)	備考
63 タップ RRC、 α = 0.35	8	30	120	0.8	2.0	LTC5599、未調整 (MER = 39.1dB)
				0.8	1.8	LTC5599、調整済み (MER = 39.8dB)

リニア・テクノロジーのLTC5599 IQ変調器は汎用性を備えた RFビルディング・ブロックで、低消費電力、高性能、広い周波数範囲、ユニークな最適化能力といった特長を備えています。このデバイスは、性能や効率を犠牲にすることなく、無線トランスミッタの設計を容易にします。



表3. kTBより約17dB高い位置で出力ノイズ 密度レベルがレベル・オフ。

周波数オフセット (MHz)	RF出力ノイズ密度 (dBM/Hz)
+6	-156.7
+10	-156.8
+20	-156.8

より広い周波数幅のスイープでは、搬送 波の高調波を除いて目に見えるスプリア ス成分は現れません。これらの高調波は、 従来通りフィルタで除去する必要があり ます。

多くの場合、例えばトランスミッタとレ シーバーが二重化されている場合や同一 場所に置かれている場合、高PAゲイン が使われている場合、あるいは複数のト ランスミッタが同時に動作する場合など は、出力ノイズ・フロアが小さいことも 重要です。図3のシステムで460MHzの 変調搬送波周波数を使って送信を行った 場合の測定出力ノイズ密度を、表3に示 します。U2オペアンプの低いノイズと LC再構成フィルタの5次ロールオフが組 み合わされたことによって、ベースバン ド・ノイズの影響が最小限に抑えられて います。 表4に示すように、3.3Vでの総測定消 費電流は96mAです。DC電力の大部分 はU1(プログラマブル・ロジック・デ バイス)で消費され、これについては、 このアプリケーションのクロック周波数 67MHzで各DFBが21.8mA(代表値) を消費すると仕様規定されています³。要 するに、デジタル消費電力の81%をDFB が占めています。デジタル・セクション の消費電流を減らす鍵がDFBアーキテク チャの最適化にあることは明らかですが、 これは本稿の範囲を超えています⁴。

まとめ

リニア・テクノロジーのLTC5599 IQ変 調器は汎用性を備えたRFビルディング・ ブロックで、低消費電力、高性能、広い 周波数範囲、ユニークな最適化能力と いった特長を備えています。このデバイ スは、性能や効率を犠牲にすることなく、 無線トランスミッタの設計を容易にしま す。

備考

- 1 テスト装置のFIRフィルタはソフトウェアで合成されるの で、数百個あるいは数千個のフィルタ・タップを実現で きます。最も重要なのは信号品質であり、遅延は問題と ならないので、このようにタップの個数を多くすることは 望ましいアプローチです。これに対し、通常、リアルタイ ム・ワイヤレス・アプリケーションでは、フィルタ遅延と EVM/ACPのトレードオフが必要になります。
- 2 低シンボル・レートのアプリケーションでは、この目的に 低消費電力の完全差動入出力アンプ/ドライバLTC1992 を使用することもできます。この場合は、チャンネル・パ スパンド内で送信ノイズ・フロアが増大するものの、DC 精度の向上とDC消費電力の削減を実現できます。
- この例では、最小DFBクロック周波数 = 30kHzシンボ ル・レート × 8xインターポレーション × 63 FIRフィル タ・タップ × 2サイクルの積和 (MAC) × 2サイクルの 算術論理演算 (ALU) = 60.5MHzです。
- AlteraとXilinxは、より高速で高度に最適化されたDFBを 提供しています。

参考資料

1 "Digital Modulation in Communications Systems – An Introduction," Application Note 1298, Keysight Technologies

表4. 総消費電力

段	内容	ICC (mA)	消費電力(mW)
U1	CY8C58LPプログラム・システム・ オン・チップ	54	178
U2	LT6238クワッド・オペアンプ	13	43
U3	LTC5599低消費電力IQ変調器	29	96
	合計:	96	317