

クーロン計測 アプリケーションに おける周波数 アンダーサンプリング

電流測定には、パルスかどうかに関係なく多くの方法が利用できますが、バッテリーへの流入及びバッテリーから流出する正味の電流フローをトラックする目的の方法は選択余地があまりありません。バッテリー駆動のポータブル装置の多くが電流センサとして非常に低い値の抵抗器を直列で使用し、直列電圧降下をデジタル量に変換しています。今日の商業用クーロン計測製品では、アナログデジタルコンバータ(ADC)方法がいくつか使用されています。デルタシグマ、及び特に電圧周波数コンバータ(VFC)方法を使う製品は、高周波信号部品を集積化することを理由に人気が高まりました。これらの理由はディスクリットサンプリングADC方法が正確でないことを暗示しているようですが、サンプリング理論の理解、ある特定アプリケーションの電流波形、及び試験データによって、ADCサンプリングを正確なクーロンカウンタとして使える理由をここで説明いたします。

ポータブル機器でのクーロン計測

まず、クーロン計測アプリケーションにおける測定システムの目的がバッテリーに入出力する電流の正味のフローを正確にトラックするためであることを理解することが重要です。バッテリーに蓄積されている正確な充電量をメンテナンスするフューエル測定を目標とする場合、正味の電流フローの正確な測定は不可欠なものとなります。ポータブル機器の電流波形は複雑ですが、ここで大切なのは電流波形の積分です(例えば波形を再構築する必要はありません)。そのため、正確な正味の充電量がメンテナンスされている限り、全ての周波数情報は破棄することができます。

ポータブルシステムのアプリケーションでの第2の要件は電流測定を加えた結果がバッテリー寿命に与える影響が低いということです。この1つとして、測定システムがバッテリーから顕著に流出することなく連続的に動作することが要求されるため、クーロンカウンタによって消費される電力を0.5mW以下に制限することが要件として挙げられます。更に、 I^2R ロスを最小にするためにバックの直列抵抗の総合値と比較して検出抵抗の値を小さくする必要があります。

多くのポータブルシステムでの正確なクーロン計測のための第3の要件は、広いダイナミック範囲です。通常、ポータブルシステムは少なくとも2つの電力レベルで動作します。1つは、スタンバイ又はアクティビティが低いかまたは定期的実施されるようなローパワーモードです。もう1つはデバイスが意図されたタスクを実行するハイパワーレベルです。普通、ハイパワーモードはローパワーモード動作の長期間の間に短時間発生するものです。携帯電話ではハイ及びローパワーモードは、それぞれ通話及びスタンバイモードと呼ばれています。携帯電話及び他の無線装置のように、多くのポータブル製品はクーロンカウンタに信号を送る方法なくして自動的にパワーモード間を切り替わります。これには長時間に及ぶ低電流レベル並びに、モード間の予測不可能な切り替を伴うより短期間の高電流レベルを報告する電流測定システムが必要です。すべての動作モードで捕捉される電流フローを正確に蓄積するためには、ダイナミック範囲にわたる直線性が要求されます。

アプリケーションの要件に関して全ての面が考慮された時に、設計上のチャレンジの程度が明確になります。何日間にわたる小電流の積分、並びに最小及び最大振幅を捕捉するために必要な35dB~45dBのダイナミックレンジの何分間にわたる大電流の積分が正確さのために必要です。測定システムは、バッテリーエネルギーを節約するため、非常にローパワーの回路で実施されなければなりません。ローパワー回路はノイズの影響を受けやすいものです。バッテリー電池及び保護回路の抵抗値が定期的に続いて降下すると、クーロンカウンタが測定しなければならない信号レベルも降下します。10m ~ 30m 範囲の受容される検出抵抗値は、結果的に数10のマイクロボルトのローパワーモード電流検出信号を生じます。数日間にわたるスタンバイモードでの正確なクーロン計測を達成するためには、分解能及び入力オフセット誤差が20 μ V以下でなければなりません。これは、25m 抵抗及び100 μ Vの組み合わせ解像度及び入力オフセット誤差によって、毎日96mAhが蓄積されるためです。完全に充電された650mAhのバッテリーは、接続されないまま1週間放置されると、完全にドレインされたようにみえるか、またはより悪い場合では充電されていないバッテリーが完全に充電されたようにみえます。

無線ハンドセット電流波形

GSM及びCDMA無線標準に適合するデジタル無線ハンドセットに見られる電流波形は、上記の2つのパワーモードの特性を示します。しかし、パワーアンプ(PA)がショートバーストで送信し、PA電流が他の負荷素子より優位になるので特に難しい状態となります。デジタルハンドセットのハイパワーモードは、通話が進行中、各送信バーストの電流パルスの繰り返しによって構成されてい

ます。スタンバイでは、PAはセルタワーの周期的ページングにตอบสนองするためかなり低い速度のパルスとなります。通常ページング間隔は0.5秒から2秒の間です。パルス速度変化の他に通話及びスタンバイモードの両方でパルス振幅が変化します。これは、PA電力が主としてハンドセットからセルタワーまでの距離に関する受信電力に対応するように調整されるためです。

GSM/GPRS

GSM標準は各チャンネルの8つのタイムスロットを構成する4.615msフレームを定義します。1つのチャンネルで動作する各GSMハンドセットが送信と受信にそれぞれ1つのスロットを使えるようにタイムスロットが共有されます。通話が進行中、PA電流は図1に示されるように12.5%のデューティサイクルをもつパルス波形を示します。

標準及び最悪ケースのPA電流はそれぞれ1Aと3Aです。図1は、通話中のフル信号強度を示すGSMハンドセットからとられた電流です。フィルタコンデンサにかかる電圧は個別にサンプルされたデバイスのADCに対して示される信号です。

GSMネットワークで実施されたGPRS標準はデータ速度を上げるために追加のスロットを使用します。追加のスロットは受信又は送信に割り当てられます。データがハンドセットからネットワークへアップロードされている時、GPRSクラス12では最高4つのスロットでデータ送信ができます。GPRSクラス12で動作しているハンドセットのバッテリー電流は、PAが4つの連続スロットで送信するので50%のデューティサイクルを示します。

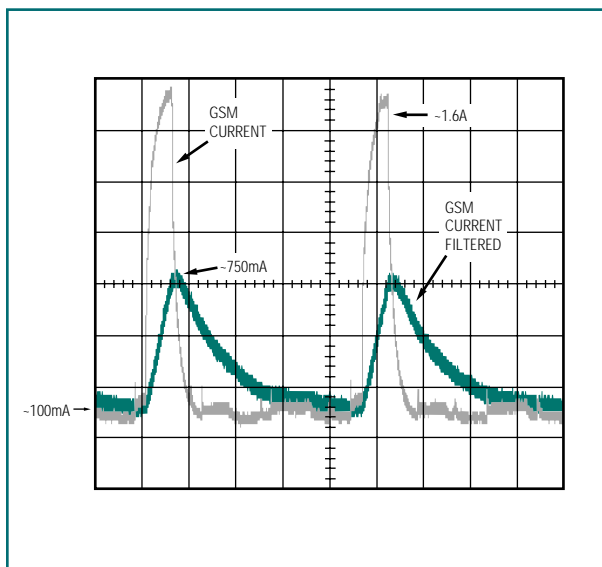


図1. GSMハンドセット電流によって音声通話中のフル信号強度が示されています。

CDMA

CDMA標準は、16の電力制御グループに分割される20msフレームを定義します。各グループは1.25ms期間を持ち、データ速度によってこの16の様々な組み合わせが使用されます。PAトランスミッタの電力は、1.25ms期間から期間へと変化します。この期間がデータ送信に使われない場合、電力は最大20dB低下します。CDMA PAの電流波形は、最悪のケースで600mAの最大振幅を持っているためクーロン計測の観点から見るとそんなに難しいものではありません。

アンダーサンプリングの理論

周波数ダウンコンバージョン及び波形の再構築に使われる意図的なアンダーサンプリング方法の厳格な定義には適合しませんが、信号周波数に近い相関性のないアンダーサンプリングによって繰り返し信号の平均値(DC成分)が正確に捕捉されます。定義では、繰り返し信号のDC値は、下記のフーリエ系列からわかるように、周波数または位相に依存しません。

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega_1 t + q_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + q_2) + \dots + A_n \sin(\omega_n t + q_n)$$

すべての A_0 、 A_n 、 q_n 、及び t に関して、 $f(t)$ の平均値 = A_0 。サンプル速度が周波数を運ぶエネルギーの高調波でない限り、信号が静止している場合(つまり A_0 が一定している場合)は重要ではありません。方形波を例として使うと、 A_0 によって代表されるDC値は周波数と共に変化しません; 基本波またはその高調波の倍数以外の周波数でのアンダーサンプリングは同様のDC成分でさらに低い周波数の方形波を捕捉します。

クーロン計測の目標を達成するために、計測対象の信号が低周波数、非繰り返し要素、またはDC成分の特徴的なモードを示しているも、アンダーサンプリングによって平均信号値の正確な測定を得ることが可能です。サンプル周波数と比較した場合、低周波数成分がナイキストサンプル速度以下、又は長期間続くディスクリットモードであっても、アンダーサンプリングは有効です。方形波の例を考え、デューティサイクルがサンプル周波数の1/10の信号で変調されると想像して下さい。サンブラは、10中8のサンプルを廃棄し、それでも忠実に変調信号を再生することが可能です。次にデューティサイクルがスローに、無作為的に3つのディスクリットモードを循環することを想像して下さい: 50%から10%そして1%というように。各モードのDC値は異なり、重要ですが、サンプル速度と比較して、各モードが十分持続する限り、信号は各モード中静止しているとみなされます。両方のケースにおいて、DC成分は正確に測定されます。

タイムベースの誤差は、波形再構築及びクーロン計測の両方に適用されるアンダーサンプリング方法にとって重要である一方、意識的なアンダーサンプリング方法を使う波形の回収はサンプル間ジッタによる歪みに対して敏感です。このようなシステムの性能には低ドリフト、低ジッタの高品質なタイムベースが重要となります。しかし、周波数と位相の情報はクーロン計測には重要でないため、サンプル間の正確な間隔を維持するタイムベースは必要とされませんが、平均周波数が安定でなければならない、正味のクロックジッタはゼロ平均を持つ必要があります。また、関連しない状態であるためには、最悪ケースのドリフトを含むサンプル周波数が信号周波数またはその高調波と等価となることはできません。タイムベースは、DC成分の正確な測定のためのゼロ平均ジッタをもつ長期の周波数安定性を維持しなければなりません。

試験結果

パルス電流クーロン計測アプリケーションにおけるディスクリットサンプル測定デバイスの効果を示すために、内部25m 検出抵抗付のDS2761高精度バッテリーリチウムイオン(Li+)モニタが使用されました。使用された試験設定が図2に示されています。実験は700mAhプリズマティックLi+電池を使って行いました。電池の充電とGSM負荷シミュレーションのためにアルビンバッテリー試験システムを使いました。

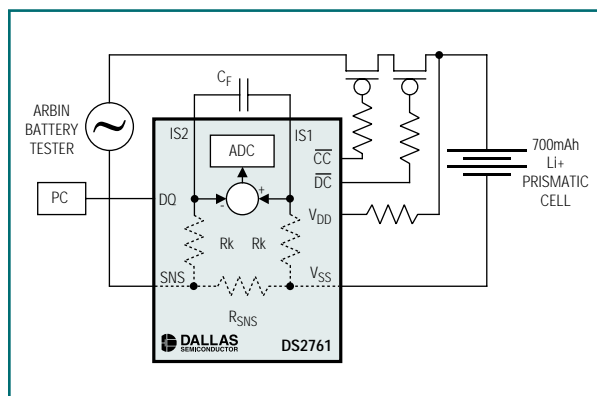


図2. パルス電流アプリケーションにおけるディスクリットサンプルクーロンカウンタの効率、アルビンバッテリーテスターからのシミュレートされたGSMまたはCDMA負荷を使って実験室で実証することが可能です。

アルビンは、以下のパターンを実行するようにプログラムされました。電池は定電流/定電圧(CC/CV)方法によって完全に充電され、その後、連続的GSM負荷の下に完全に放電されました。そして再度充電され、最後にGSM負荷平均と等価のDC負荷のもとで完全に放電されました。PCによって5秒毎にDS2761のデータ(リアルタイム電流、温度、電池電圧、及び蓄積された電流)が記録されました。このプロファイルは図1に示されるように、

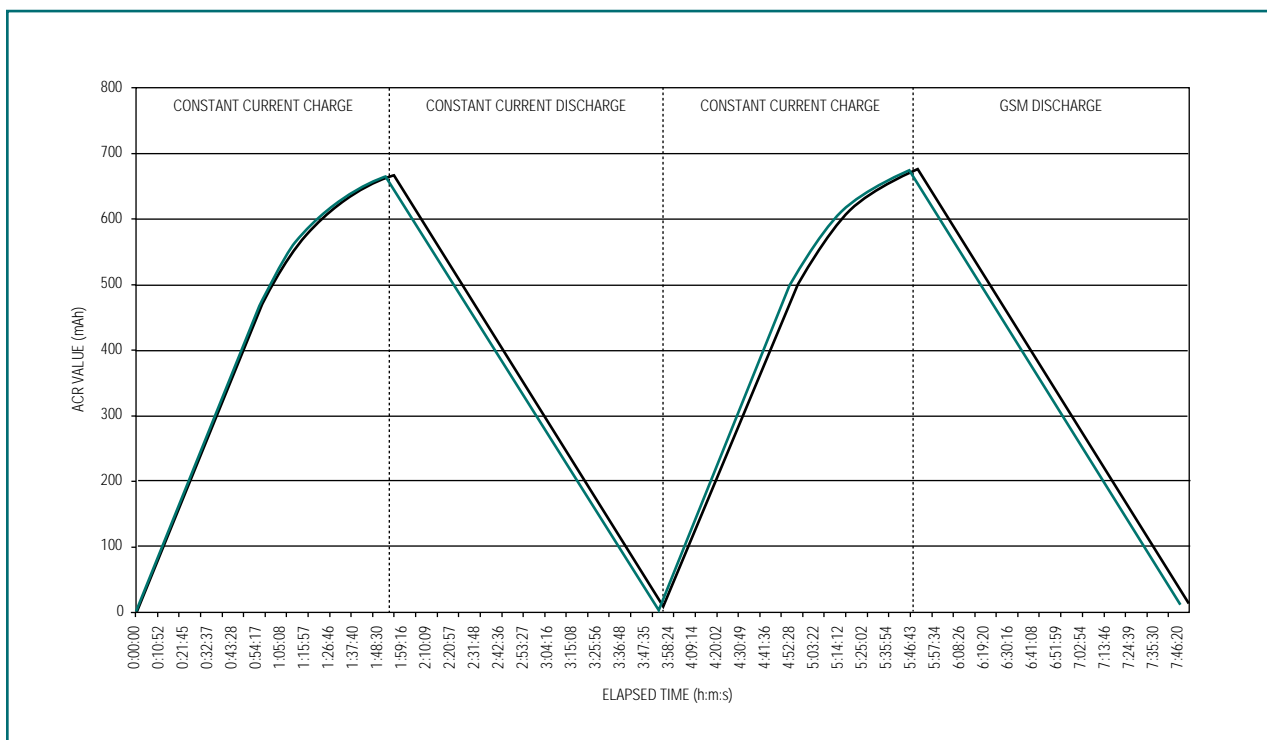


図3. 2つの波形はプレフィルタコンデンサ付又は無しの状態でのDS2761 ACR弁を示しています。

表1．充電及び放電エンドポイントでのACR値

エンドポイント	フィルタ済み		フィルタ未処理		フィルタデルタ	
	経過時間	ACR	経過時間	ACR	経過時間	ACR
CC/CV充電	1:51:27	664.95	1:54:24	665.69	0:02:57	0.11%
CC放電	2:01:20	657.11	2:01:08	656.62	0:00:12	-0.07%
CC/CV充電	1:52:13	664.71	1:53:12	665.69	0:00:59	0.14%
GSM放電	2:00:57	660.54	2:01:12	659.69	0:00:19	-0.18%
CC/GSMデルタ	0.32%	-0.49%	0.11%	-0.39%		

利得、オフセット、分解能、充電効率誤差、及びACRが常に同一のポイントに回帰しないことに寄与する他の因子について議論することは本稿の範囲を越えるものです。これに関しては、今後発行予定の「マキシム/ダラスセミコンダクタエンジニアリングジャーナル」でディスクリートサンプル及びその他の測定トポロジー(シグマデルタ、VFC)について述べる際に検討されます。本稿はパルス波形のクーロン計測アプリケーションにおける周波数アンダーサンプリングを確認追求するもので、本表の最後の列に記載されたデータが最も大きな関心事となります。

プレフィルタコンデンサ($C_F=0.1\mu F$)を使って1度実施され、その後ADCに呈示された波形の振幅を降下させるプレフィルタの効果を調べるためにコンデンサを使わずに繰り返し実施されたものです。

充電サイクルでは、電池は0.7C(490mA)の定電流で電池電圧が4.2Vに達するまで充電され、4.2Vの定電圧で充電電流降下が0.1C以下に降下するところでオフされました。GSM負荷は2.0Aピーク電流を使って550 μs 及び4.6ms(12%デューティサイクル)期間、シミュレートされました。パルス間の電流は100mAにプログラムされました。このようにしてGSM波形から平均電流327mAが生じました。電池は電圧が3.0Vに達した時、完全に放電したとみなされました。

この実験結果は2つの方法で示されます。図3には、電荷、CC放電及びGSM放電サイクルに対する時間の関数としてDS2761蓄積電流抵抗(ACR)値が表示されています。この2つの波形はプレフィルタコンデンサ付と無しの状態のACRを表示しています。この実験では各充電/放電サイクルのエンドポイントでACRに対して何の補正も行っていない。しかし、通常は燃料ゲージングアルゴリズムによって実行されます(アプリケーションノート131、「*Lithium-Ion cell fuel Gauging with Dallas Semiconductor Devices*」を参照して下さい)。

入力オフセット又は分解能誤差がなく、電池の充電効率が100%だった場合、電池が完全に放電する時は毎回ACR値がゼロに戻ると期待されます。実際には表1に示されるように、測定誤差及び電池の充電非効率性がそれぞれの充電/放電エンドポイントでのACR値に現れる誤差に寄与します。

プレフィルタを使ったパルスGSM負荷及びGSM波形の平均に等しいDC負荷における電池の完全な放電の際の時間差は、23秒、またはDC負荷での総放電時間の0.32%に等しくなります。これら2つの負荷下で減少したACRの差は、3.43mAhまたは定格電池容量の0.49%でした。放電時間及びACRデルタは、実際プレフィルタなしの場合の方が低く、各0.11%及び0.39%でした。

表1は、エンドポイントでの偏差を示していますが、サイクル時間は放電プロファイル及びフィルタコンデンサが使われているかどうかによって変化しました。図4は、この点に関して、フィルタコンデンサの有無に係わらずGSM及びCC放電サイクル間のACR差を時間関数としてハイライトすることによって詳しく示しています。この曲線は図3に示されていた放電サイクルからとったものですが、ACRデータのオフセットを取り除き、それぞれの放電開始時に等しくなるようにしました。この方法で、前サイクルからのオフセットをゼロにしてGSM及びCC放電間のACRデルタを表示することができます。

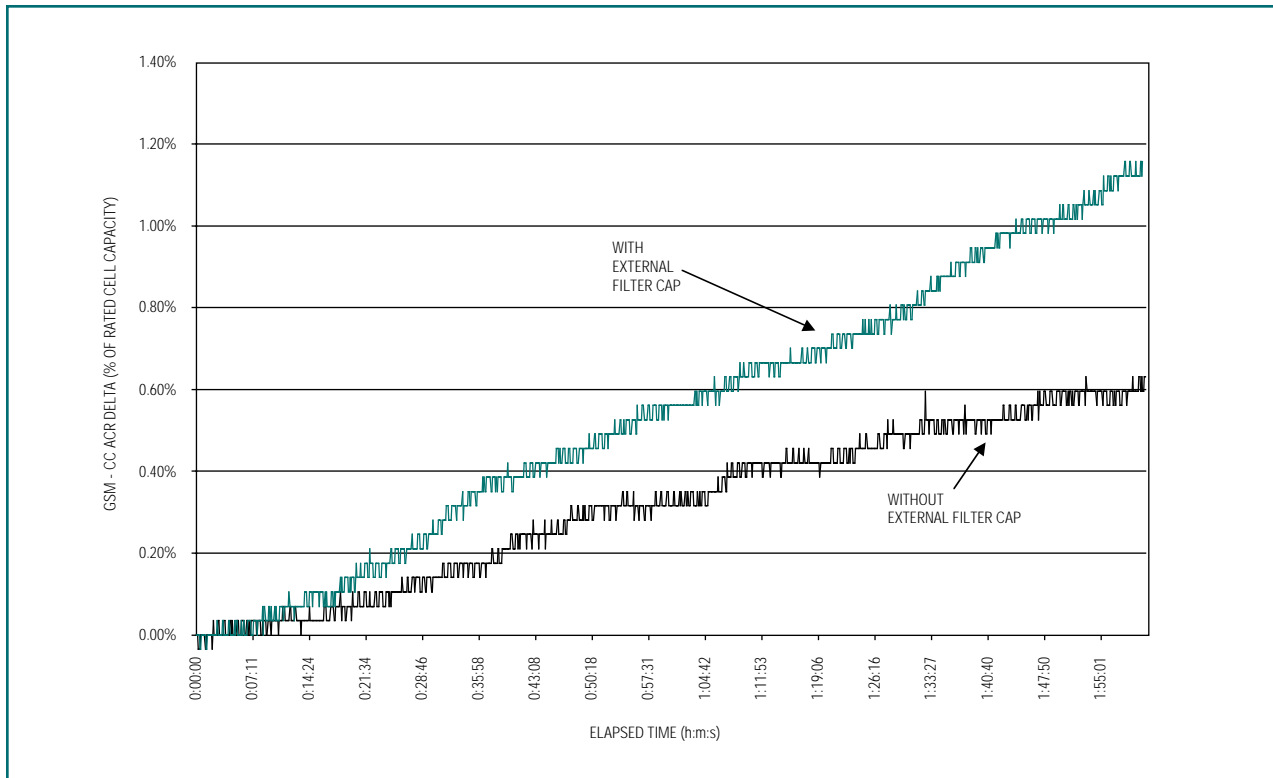


図4. GSM及び低電流放電間で測定されたACRの差によってエンドポイントにおける偏差を示しています。

エンドポイントデータと一貫し、フィルタコンデンサの存在は利点を提供しませんが、GSM負荷での性能を劣化させるようにみえます。プレフィルタは高周波でのエネルギーを積分し、サンプル速度要件を低減しますが、その主な目的はパルス負荷におけるADCのダイナミックレンジを拡張することにあります。12%デューティサイクルでの(図1の750mAフィルタ済みピーク)1.6Aパルスは、DS2761の1.8Aダイナミックレンジの限界を越えないので、フィルタは何の利点も提供しません。フィルタ未処理の信号がADCを飽和する可能性のある高電流またはより大きなデューティサイクルを持つアプリケーションではプレフィルタの利点がより明白となります。

結論

一瞥では測定する周波数付近をサンプルするディスクリートADCサンプリングは適応しないようにみえるかも

しれません。一般的にはナイキストサンプリング基準を適用しようと考えますが、本研究では、アプリケーションの要件及びアンダーサンプリング方法を適用するための必要な基準を検討し、特に、信号の平均値測定に関連する基準を検討しました。信号周波数付近での非相関的アンダーサンプリングの概念が、繰り返し信号のDCコンテントを捕捉するための正確な方法として質的に表示されています。更に、周波数アンダーサンプリング方法は、DS2761高精度Li+バッテリーモニタを使って充電及び放電(DC及びパルス電流)サイクル中に測定された数値によって量的にサポートされました。データは、DC放電及びGSM負荷放電の下でのクーロンカウント間の偏差が定格電池容量の1%以下であることを示しています。