

マイクロコントローラにより、8051を使用した設計の電力効率を改善

ポータブル製品の機能と能力は日々進歩しています。製品に対するカスタマの要求が増すと共に、大きな計算能力が必要となります。同時に、カスタマは消費電力の小さな製品を求めます。こうした競合する要求の核心にあるのが、ポータブル機器の中で最も消費電力の大きなマイクロコントローラです。

低電力プロセッサは数多くありますが、性能的には限界があるのが普通です。ガラスセミコンダクタの高速マイクロコントローラファミリは、電力と性能のバランスが優れています。本製品は定評のある8051構造をベースにしています。使いやすく、I/O構造が豊かで、しかも広く受け入れられている点で、8051は設計者の間で好評です。8051はポータブルの分野にも普及してきており、多くのアプリケーションに使用されています。

本稿では、8051コントローラを使って消費電力を最小限に抑える方法について説明し、特に高性能8051を使った設計のバッテリー寿命を延ばす新しい構造改良に焦点を当てています。消費電力を低減するために周辺デバイスをチップ上に集積化し、正しいクロックソースを選択する方法について説明します。電力を節約するためのソフトウェア技法を示すと共に、ストップモードを使ったシステムの節電方法についても説明します。

クロック速度

マイクロコントローラ設計において消費電力を決定する最も重要な要因はクロック速度です。コンプリメンタリメタルオキサイド半導体(CMOS)デバイスの消費電力は、クロック速度に直接比例します。従って、消費電力という観点からはプロセッサをできるだけ遅い速度で動作させるのが有利です。

図1に、一般的な8051マイクロコントローラの標準電力曲線を示します。この関係は全てのポータブル機器設計者が知っています。一般に、電流対周波数特性は直線的で、DCオフセットがあります。この自己消費電流はチップ上のコンパレータ、オペアンプ等の静的回路に起因します。これは値としては小さいですが(<1mA)、常時消費される電流として考慮する必要があります。

省電力設計においては、常に動作速度をできるだけ遅くしようとします。最小システム周波数(ひいては最小消費

電力)の決定は、必要な性能及び割込み待ち時間を含むいくつかの要因に依存します。しかし、どのような基準を用いるにせよ目的は同じです。すなわち、アプリケーションの要件にできるだけ近いところに動作周波数を合せるということです。

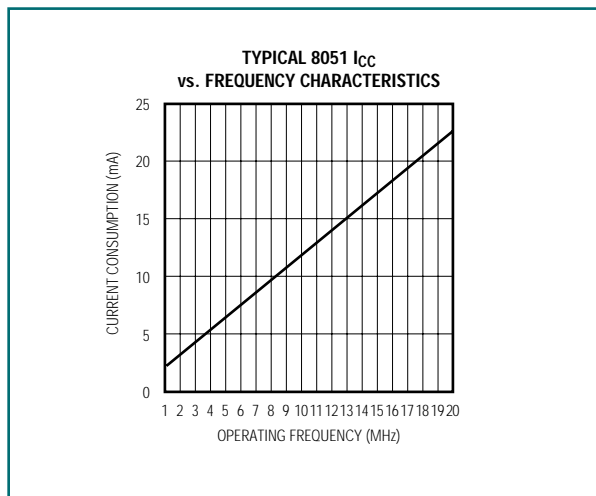


図1. 一般的な8051マイクロコントローラの標準電力曲線

高速コア

8051を使った設計において、消費電力を減少させる最も直接的な方法はマイクロコントローラの効率を改善することです。8051の元々の設計は12クロック、2フェッチ/マシンサイクル構造をもとにしています。しかし、この高速マイクロコントローラファミリの場合には4-又は1-クロックサイクルコアを使用しています。これは計算効率が高く、命令を実行するために必要なクロックサイクルが少ないために、実行時間が速くなり、最大クロックレートが増加します。

通常、高速度コアの利点としては性能面が目目されますが、消費電力の面でも重要な利点があります。プロセッサの命令実行が最適化されると、同じタスクを達成するために必要な時間が短くなります。多くのポータブル製品はバーストモードで動作しますが、このモードにおいては環境データの記録、バーコードのスキャンといった短時間の作動の後に長時間の非作動期間が続きます。プロセッサが作動していなければならない時間を短縮すれば、その分だけエネルギーの消費も少なくなります。

こうして効率が改善されると、クロック速度を低減しながら同等の性能を維持することもできます。再設計されたコアが12ではなく4クロック/サイクルで動作すると、クリスタルの速度を下げて同じ量の作業を達成することができます。消費電力はクリスタルの速度に直接比例

するため、性能を犠牲にすることなく消費電力を低減することができます。

図2に、同じレベルの性能で同じタスクを実行する3つのマイクロコントローラの消費電力を示します。2つのマイクロコントローラは12外部クロック/マシンサイクルで動作する標準80C3xタイプ、もう1つは4クロック/マシンサイクルで動作するDS80C320マイクロコントローラです。全てのデバイスについて消費電流を測定し、DS80C320の性能改善度を小さめに250%(2.5x)と仮定した上で比較しました。この図から明らかなように、クロック/サイクルを低減したコアは同じスループットで見た場合に著しく電流が低減します。この傾向は高性能レベルで特に顕著です。

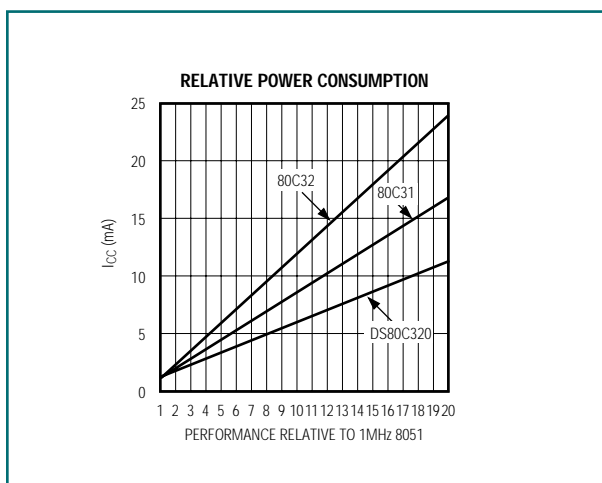


図2. クロックサイクルを低減したコアは、同じスループットに対して消費電流が小さくなります。

集積化

周辺デバイスをチップ上に集積化するのも節電の方法の1つです。チップ外で信号を駆動する場合、発生デバイスは外部負荷を駆動するために必要なスイッチングパワーとDC損失に対処しなければなりません。スイッチングパワー(PSW)とは、デジタル信号が変化する時に消費される電力です。スイッチングパワーは次式で近似することができます。

$$P_{SW} \propto CV^2/T \quad (1)$$

ここで、Cは受信ゲート入力容量と2つのゲート間の相互接続の集中容量、Tは信号のクロック周期です。CMOS入力の標準的な入力容量は10pFです。システムのスイッチングパワーの正確な値を計算することは困難ですが、マイクロコントローラが駆動しなければならない外部負荷やピンが増える度にそれだけ余計に電力が消費されることは明らかです。

マイクロコントローラを使ったシステムは、いくつかの周辺デバイスを使用しているのが普通です。こうした周辺デバイスとしては、外部UART、パワーオンリセット回路及びウォッチドッグタイマ等が挙げられます。8051製品ファミリの強みの1つは、数多くの周辺機能がチップ上で提供されていることです。周辺デバイスの集積化により部品点数が減少して設計がシンプルになるだけでなく、消費電力の低減にもつながります。周辺デバイスの本来の機能は、そのデバイスがプロセッサの内部にあっても外部にあっても同じ量の電力を消費すると仮定できます。しかし、周辺デバイスをチップ上に配置することにより、外部バスの駆動に伴うスイッチングパワー損失を排除することができます。

内部プログラムメモリ

8051のもう一つの機能で、一般には周辺機能として認識されていないものとして、プログラムメモリがあります。8051タイプは全て、様々な量のオンチッププログラムメモリを備えています。これは多くのシステム設計者から部品点数と基板面積を減らす方策として望まれています。ポータブル機器のバッテリー寿命の改善にも貢献します。前述のように、外部バスを駆動する必要がなくなるため消費電力が減少するからです。オンチップメモリには更にもう一つの節電効果があります。8051構造は、アドレスの下位バイトのデマルチプレックス用に74373タイプのラッチを必要とします。図3にプログラムメモリが内部の時と外部の時の比較が示されています。第1の例は74AC573と27C256 EPROM(アクセス時間70ns)付のDS87C520高速マイクロコントローラです。第2の例は同じコントローラを内部メモリで動作させた例です。いずれのシステムも11.0592MHzで動作していて、短いプログラムを実行しています。この図から明らかなように、外部EPROMとラッチをシステムから排除することによって高周波で49mAもの電流を節約することができます。

内部データメモリ

前述のように、外部RAMの代わりにオンチップメモリを使用すると電力が節約されます。80C32タイプのスクラッチパッドは大きくなっているため(256バイト)、小さなプログラムの一部のデータ保存及びスタック動作に十分です。このため、外部RAMを排除することができます。

しかし、これ以上のデータメモリを必要としたり外部スタックを必要とする設計の場合は、SRAMを追加する必要があります。低電力SRAMは提供されていますが、消費電力には74373シリーズラッチに伴う分及び外部バスを駆動する時の容量性損失を含める必要があります。この問題は、拡張オンチップRAMを供えたデバイスを使用することで軽減することができます。

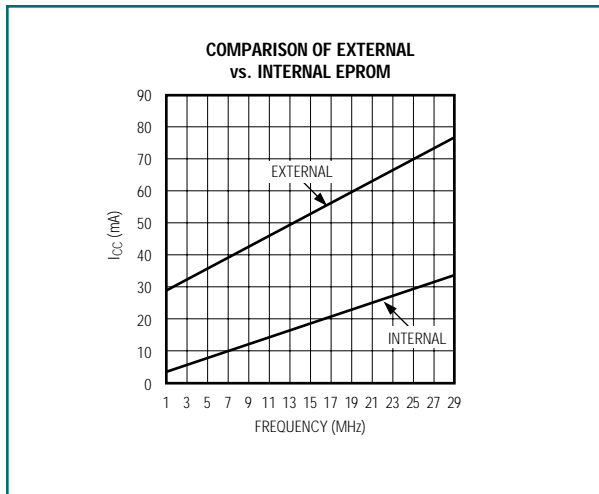


図3. 内部メモリの使用により消費電流を大幅に低減

図4に、8051 MOVXデータスペースにマッピングされたSRAMを使った2つのシステムの消費電力を示します。第1のシステムではDS87C520高速マイクロコントローラに74AC573ラッチ及びDS2064 SRAMを付けています。第2のシステムでは同じマイクロコントローラを使っていますが、内部MOVXデータメモリを1Kバイト使っています。いずれのマイクロコントローラも11.0592MHzで動作し、MOVXデータメモリの読取りと書き込みを行う短いプログラムを実行しています。この図から明らかなように、外部SRAMとラッチをシステムから排除することによって高周波数で9mAもの電流を節約することができます。

クロックソース

電力の観点から見て、もう1つの重要なシステム部品はクロックソースです。標準的な8051設計においては、外部水晶クリスタルを内部発振器アンプで励起するか、あるいは外部クリスタル発振器を使用します。外部クリスタル発振器が使用されている場合、クロックの波形が消費電力に影響を与えます。XTAL1ピン(外部クロック信号を8051に供給するために使用)の入力段階はコンプリメンタリドライバを使用するのが普通です。入力クロックがハイとローの間で遷移する時、これらのドライバが一時的に両方ともオンになり、大きな電流が流れます。矩形波の場合はハイとローの間の遷移がほとんど瞬間的であるため、両方のデバイスがオンである時間は最小限になります。立上がり/立下がり時間の遅い波形(例えばサイン波と三角波)は遷移を完了するのに時間がかかるため、両方のドライバがオンである時間が長くなります。このために電流と消費電力が増加します。

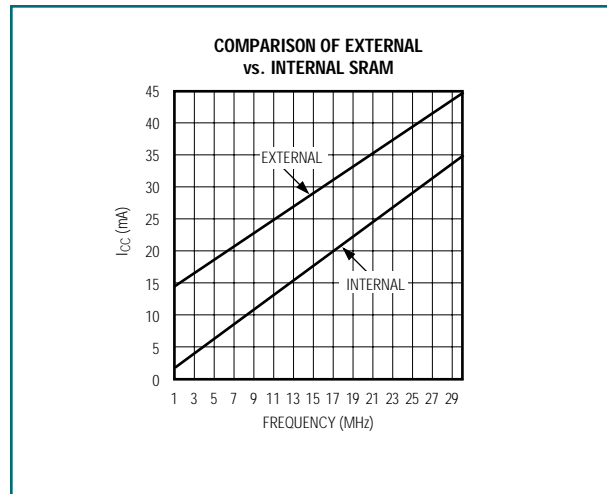


図4. 内部SRAMとラッチの排除により電力を節約

図5に消費電流と波形の関係を示します。クロックソースは設定可能な波形発生器で、サイン波、三角波又は矩形波を出力する能力を持っています。示されている消費電流は4つのデバイス(従来のコア及び高速コア)の平均です。この比較から、消費電流がクロック波形の立上がり(及び立下がり)時間に直接比例することが分かります。三角波は傾きが最も小さく、矩形波は傾きが最も大きくなっています。矩形波は平均的に三角波よりも0.75mA小さくなっています。これは、外部クロック発振器を使用する場合には、立上がり及び立下がり時間の短い発振器を使用することで消費電流を低減することができるということを示しています。このことは周波数が低くなると更に重要になります。なぜなら、デバイスの遷移時間が長くなるからです。

一部の8051タイプはオンチップ内部リング発振器を使用しています。これはパルスを伝播する一連のインバータからなっています。これにより、デバイスを駆動する能力を持った約2MHz~4MHzの内部クロックソースが提供されます。これはクリスタルを使用しなくても良いため、非常に低電力のクロックソースとなります。DS87C520高速マイクロコントローラの実験結果、リング発振器を使った動作により、約3.6mAで7MHz 8051に相当する性能が得られることが分かっています。リング発振器はピエゾ電気式クリスタルのような安定性は持っていませんが、低電力であることと、パワーオン遅延が無視できるほど短いことにより、電源管理上重要な要因となっています。

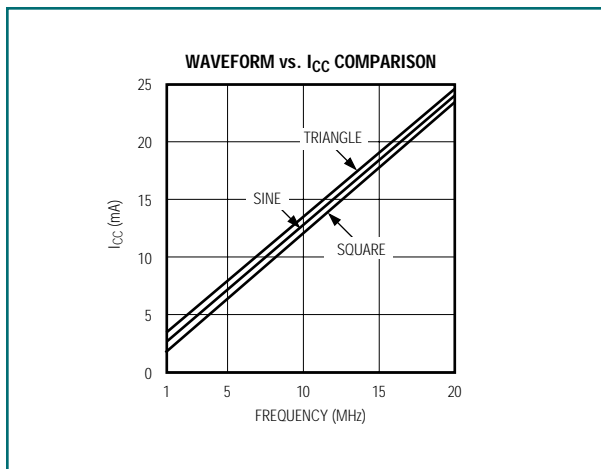


図5. 発振器波形エッジが鋭い方が消費電力は減少します。

クロック管理

前述のように、マイクロコントローラの動作周波数は、デバイスの消費電力に最も大きく影響する要素です。システムクロック周波数は主にハードウェア機能ですが、8051はこの抑制をある程度制御できます。これは、デバイスの一部又は全部の内部動作周波数を減速又は停止することで可能になります。従来の8051構造には、アイドル及びストップという2つのクロック制御モードがあります。

ストップモードの改善

ストップモードは、8051の設計者が使用できる最も低電力の状態です。このモードにおいては、内部クリスタルアンプが停止し、デバイスの動作が止まります。ストップモードの解除は通常、外部リセットにより行われます。外部割込みを使用してストップモードを解除している製品もあります。

ストップモードの欠点の1つは、クリスタルが動作を再開しつつある「デッドタイム」に電力が消費されることです。クリスタル発振器の動作は水晶クリスタルの動きに依存しています。物理的な制限のために、クリスタルの発振がデバイスの動作に十分な振幅に達するにはある程度の時間を要します。このウォームアップ期間は、クロックソースが外部クリスタル及び内部クリスタルアンプであるかどうか、又は外部クリスタル発振器を使用しているかどうかに関わらず存在します。期間の長さはクリスタル及び関連アンプの特性によって異なりますが、3ms～12msです。

消費電力に対するウォームアップ期間の影響とは、この期間中デバイスが有用な動作を行わないのに電力を消費することです。これは、デバイスが頻繁にストップモードに入ったりする場合、又は短いタスクを実行するために

ストップモードを解除する場合に問題となります。実際、タスクが非常に短い場合(5ms以下)は、クリスタルのリスタート期間の方がタスクそのものより大きな電力を消費することになります。リング発振器を使用してストップモードから「クイックスタート」を行うなら、この遅延を避けることができます。これにより、ストップモードを解除する時の消費電力を大幅に低減できます。

図6に、ストップモードを解除して短いタスクを実行している2つのシステムの動作を示します。1つは従来の外部クリスタルを備えており、もう1つは内部リング発振器を備えています。リング発振器を持たない方のデバイスは、クリスタルのウォームアップ期間中待たなければなりません。この間デバイスは電力を消費しますが、有用な作業は行われていません。第2のデバイスは内部リング発振器を備えたDS87C520高速マイクロコントローラで、ストップモード解除後直ちに動作を再開することができます。この例の場合、ルーチンは約2MHzで4ms以内に実行されます。図に示すように、ストップモード解除時に短いタスクを実行する場合は、リング発振器を使用することによってエネルギー消費が大きく低減されます。

アプリケーションによっては、ストップモード解除後の短時間の間クリスタル発振器特有の安定性が必要とされます。リング発振器は、そのような場合も有用です。ストップモード解除の直後、デバイスはクリスタル発振器を再スタートします。続いて、クリスタルがまだウォームアップしている間に、必要なデータ又はレジスタを初期化します。殆どの高速マイクロコントローラは、クリスタル発振器が安定したかどうかを示すステータスビットを備えているため、クリスタル発振器コードの初期化ルーチン完了後にソフトウェアによってステータスビットをポーリングすることにより、高精度タイミング動作をいつ始められるか決めることができます。

ストップモードの効率を改善するもう1つの方法は、リセットではなく割込みを使用して解除することです。これにより、プロセッサはリセットベクターからリスタートする必要がなくなり、STOPビットの設定に続く命令により直ちに動作を再開します。リセットの原因を決定する必要がなくなるため、短時間のうちに有用なタスクを開始することができます。

アイドルモード

アイドルモードは、オリジナルの8051構造で使用されている第2クロック管理モードです。このモードはCPUの動作を停止しますが、チップ上の汎用タイマの動作は維持します。省電力アプリケーションにおいては、これらのタイマを使って定期的にデバイスをウェイクアップしてタスクを実行するか、又はタスクを実行するべきかどうかをポーリングします。

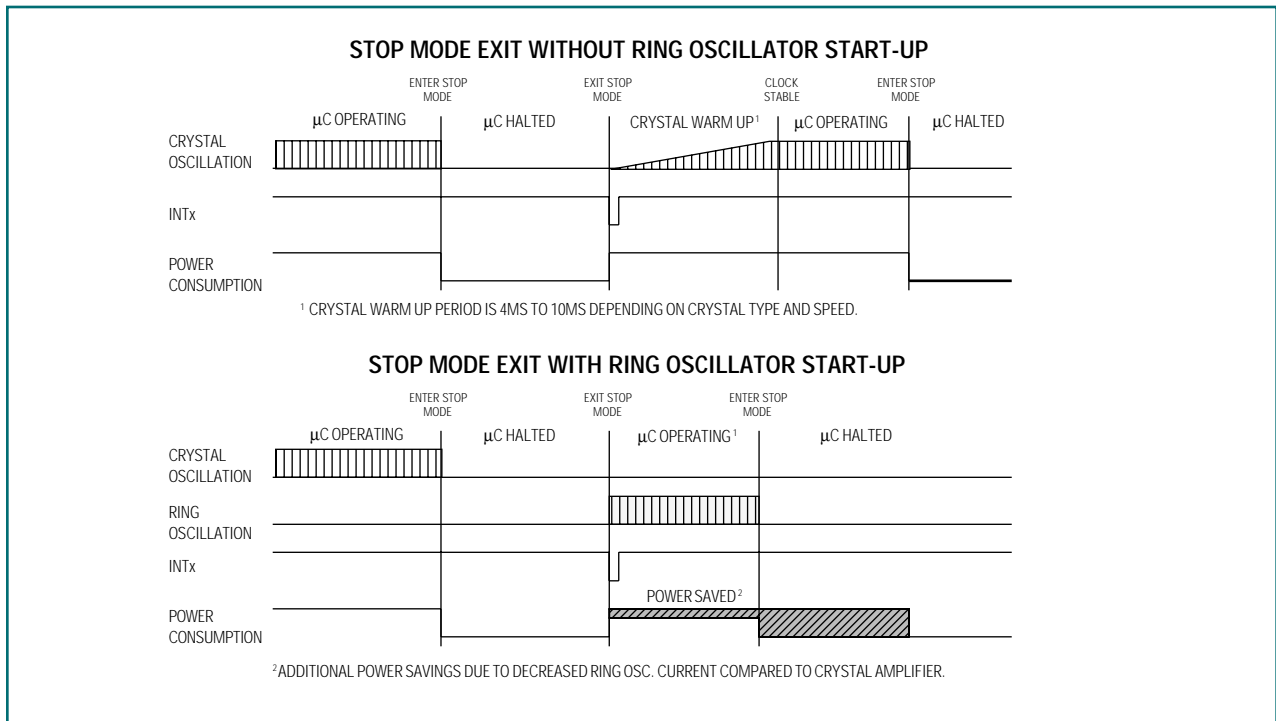


図6. リングがある場合とない場合のストップモード解除の比較

標準8051タイマは16ビットに制限されているため、許容される最大タイムアウト期間はクロック速度が16MHzの時に31msです。これより長い期間が必要な時は、複数タイマのオーバーフローが必要となります。この場合、デバイスは時々カウンタを動作させるためにフル動作を再開する必要がありますが、有用な動作はしないため、消費電力が増加します。

長いタイムアウト期間を必要とする場合は、長期間の内部タイマを使用して下さい。8051の中にはウォッチドッグタイマを備えたものがあり、これをデバイスのウェイクアップにも使用することができます。ウォッチドッグタイマは、長いタイムアウト期間(およそ226クロックサイクル)に設定することができます。これにより、16MHzで4.2秒の最大タイムアウト期間が可能となります。例えば、3秒毎に低電力状態からウェイクアップしてタスクを実行するアプリケーションがあるとします。この動作を内部タイマで計時する場合、デバイスは有用な作業をすることなく96回もアイドルモードから解除される必要があります。タイムアウトの長いウォッチドッグタイマを使えば、デバイスは1度だけアイドルモードを解除してタスクを実行し、低電力状態に戻ることができます。

もう一つの方法は、リアルタイムクロック(RTC)付マイクロコントローラの使用です。DS87C530高速マイクロコントローラは、24時間までのアラーム期間を発生することのできるRTCを備えています。このアラームによって生成された内部割込みにより、デバイスのアイドル

又はストップモードを解除できます。RTCによるストップモードの解除は、デバイス動作の長時間停止に最も効率的な方法です。

電源管理モード

アイドルモードはプログラムの実行を停止することによって消費電力を低減しますが、内部タイマは引き続き外部クロック周波数で動作します。この場合タイマは基本的に「スタンバイ」状態で動作していることになるため、相当な電力の消費量になります。

デバイス全体のクロック速度を低減する方法の方が適しています。これは内部クロック分周器によって実現することができます。この分周器は、CPUに入る前の外部クロック周波数を分周します。DS87C520高速マイクロコントローラはこの方式を取り入れており、2つのクロック分周器機能を採用しています。即ち電源管理モード1(入力クロックソースを64分周)と電源管理モード2(入力クロックソースを1024分周)です。これらのモードは、特殊機能レジスタの対応するビットを設定することでイネーブルされます。

図7に、DS87C520高速マイクロコントローラのクロック分周器とクロック制御モードの比較を示します。この図では、フルスピード(4分周)、電源管理モード1(64分周)、電源管理モード2(1024分周)、アイドルモード及びストップモードの電流消費が比較されています。予想通り、全ての内部クロックが停止するストップモードは消費

電流が最小です。この比較で興味深いのは、2つの電源管理モードの消費電流がアイドルモード時より小さいことです。即ち、デバイスは電力を節約できるだけでなく、低レベル動作で機能し続けることができます。従来の8051構造の場合、あらゆるタイプのCPU動作は「オール・オア・ナッシング」でした。高性能レベルが必要とされるのはほんの短期間であっても、デバイスは常時最高性能レベルでの動作を強制されていました。このため消費電力が不必要に増加していました。電源管理モード(PMM)を使用すると、デバイス(及びシステム)の消費電力を、必要な性能レベルとマッチさせることができます。

PMMにおける割込みの使用

内部クロック分周器を使用すると、割込みの待ち時間が非常に長くなる可能性があります。又、内部タイマを遅くすると、8051のシリアルポートが標準ボーレートを発生したり、それと同期する能力に影響します。これは、デバイスが外部刺激に应答する能力を大きく損なう可能性があります。この問題に対するソリューションの1つは、外部割込み又はシリアルポートのアクティビティが認識された時に、デバイスを自動的にフル動作に回復する機能を導入することです。DS87C520ではそのような機構が実現されています。このデバイスのスイッチバック機能は、外部割込みへの迅速な应答を可能にしています。割込みが認識されると、デバイスは直ちにソフトウェアの介入なしにフルスピード(4分周)へと自動的にスイッチバックします。

シリアルポートも同じ様に動作します。シリアルポート受信ピンに立上がりエッジ(スタートビット)が受信されると、デバイスは自動的にフルスピード(4分周)にスイッチバックします。これは伝送の始めに直ちに実施されるため、デバイスは残りの伝送をフルスピードで正しく受信することができます。従来の8051構造では、低電力

設定でシリアルポートを使用できるのはアイドルモードのみでしたが、電源管理モードの使用は、更に低電力の代替法を提供します。

バーストモード動作の改善

省電力設計における一般的な動作モードは、システムをストップモードからウェイクアップし、バースト動作した後で又ストップモードに戻る、というものです。そのようなシステムにおいて消費電力を低減する1つの方法は、動作周波数の増加です。これは一見、直感的に誤りのように思えます。なぜならデバイスの動作時に消費する電力が、低周波数動作のシステムより大きいからです。しかし、システムが動作している時の自己消費電流は周波数の関数ではありません。最終的システム設計においては、エネルギーの評価は通常、バッテリー寿命を決めるために行われます。この区別は、時間と処理能力の概念を複合している高性能マイクロコントローラの評価において重要です。所与のシステムにおける電力と時間の積が小さければ、必要なエネルギーは各項の値に関係なく小さくなります。高速マイクロコントローラは多くの場合、高速で短時間動作することにより(低速長時間動作と比べて)エネルギー消費を低減します。

これは、もう一度図7を見ると分かります。例えば、DS87C520はストップモードから再開する時に、I/Oポートを読み取り、演算を行い、結果を別のポートに出力しなければならないと仮定します。そのために500マシサイクルのCPU時間を要するとします。図7を見ると、消費電流は10MHzにおいて12.4mA、30MHzにおいて34.6mAです。表1に、両方の速度におけるタスクの結果を示します。この表から分かるように、最もエネルギー効率が高いのは30MHzであり、エネルギー消費が6%以上減少しています。

大急ぎの後で待機

多くのアプリケーションの場合、ストップモードから抜け出る時間は全面的に速度に依存するわけではありません。デバイスが、一定の応答時間を持つA/Dコンバータやサーモスタット等の周辺機器にアクセスする必要がある場合もあります。その場合マイクロコントローラは、プロセスを始めるためにバースト動作して、その後は殆ど又は全くアクティビティのない期間が続きます。こうした場合は複数の電力節約技法を組み合わせると効果的です。

こうしたシステムにおけるPMM付の高速マイクロコントローラの利点を、実用的な例を使用して示します。DS87C520がDS1620デジタル温度計及びサーモスタットにインタフェースされていると仮定します。このデバイスは、モード0で動作する標準8051シリアルポートを使用してシリアルでアドレス指定されてい

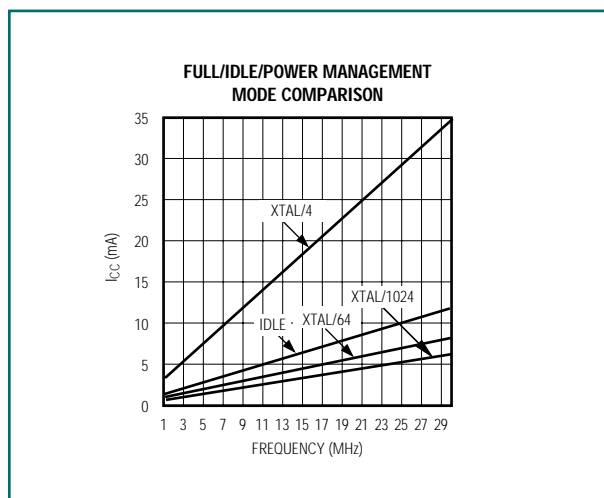


図7. フル/アイドル/電源管理モードの比較

表1. エネルギー消費対プロセッサ速度(500マシンサイクルのタスク)

| Clock Frequency | Machine Cycle Period | Machine Cycles Required | Total Time | I _{CC} | Current Time Product |
|-----------------|----------------------|-------------------------|------------|-----------------|----------------------|
| 10MHz | 400ns | 500 | 200s | 12.41mA | 2.48As |
| 30MHz | 133ns | 500 | 66.5s | 34.66mA | 2.30As |

ます。ホストプロセッサは、時々外部割込みを使用してDS87C520をストップモードからウェイクアップして、DS1620から温度を読取らせます。データを取り込んだ後、DS87C520はそのデータを(後で送信するために)内部メモリに保存します。DS1620は多くのA/Dコンバータと類似の動作をします。即ち、変換を始めるためにコマンドが出されて、その変換が完了するまでの遅延があり、それからデータがシフトアウトされます。DS1620の場合、変換時間は約1秒です。このデバイスは変換がいつ完了したかを知るためにポーリングされます。DS87C520は、初期化と計算を高速で実行することができるため、こうしたタスクに適しています。その後、変換の完了を待つ間はPMM状態になります。従来の8051の場合、変換が始まるとアイドルモードを使用して低電力状態になります。このモードを使用すると、内部16ビットタイマを使用して変換期間を測定することができます。従来の8051が16MHzで動作している場合、変換が完了するまでに32回もアイドルモードを解除しなければなりません。

この例を更に改善することもできます。DS1620は同期デバイスとしてアドレス指定されるため、高精度タイミング動作は必要ありません。この結果、マイクロコントローラは初期化及び変換結果の読取り時に、リング発振器から動作することができます。これにより、外部クリスタルを安定化するために必要なデッドタイムが不要となり、更に電力を節約することができます。

図8に、上述の「大急ぎの後で待機」方式を使用する2つの8051システムの動作を示します。この図から分かるように、ストップモード解除後のプログラム実行中に電力が大きく節約されています。アイドルモードの代わりにPMM2を使用することによる電力節約分に加えて、クリスタルのウォームアップ期間がなくなるためにルーチンを素早くストップモードに戻すことができます。1秒間の変換遅延中にリング発振器から動作することにより、プロセッサ速度は更に遅くなり電力が節約されます。

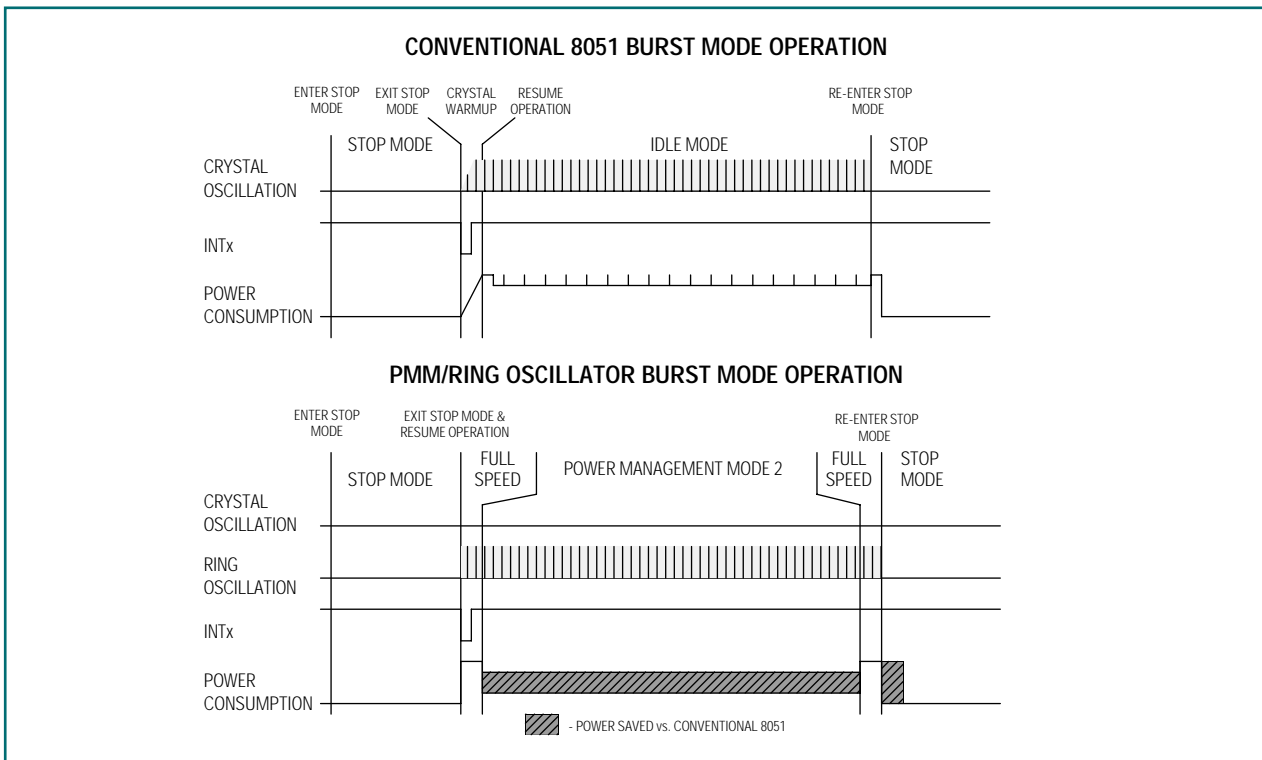


図8. 8051の「大急ぎの後で待機」方式

まとめ

8051マイクロコントローラファミリは引き続き世界中で好評を得ており、使い易く比較的高性能であるため、携帯及びハンドヘルド機器を含めた多くのアプリケーションに最適です。ダラスセミコンダクタの高速マイクロコントローラは、コストの高い再設計を必要とせずに既存の8051設計の電力効率改善を可能にしています。

消費電力を低減する高速マイクロコントローラの利点をまとめると、以下のようになります。

- 高性能CPUは、プロセッサクロックを遅くすることができるため、少ない電力で同レベルの性能が得られます。又、消費電力を増やすことなく既存システムの性能を向上させることができます。
- 高速マイクロコントローラには、ウォッチドッグタイマ、予備UART及び高精度リセット回路等の機能が組み込まれています。外付部品の場合は消費電力が大きくなります。

- 2つの新しい低電力モードの導入は、アイドルモードの低電力代替法が提供されています。DS87C520で使用されているような電源管理モードは、消費電流を低減するだけでなく、低状態でプロセッサがポーリング等のタスクを実行することを可能にします。従来の8051構造の場合、最小限の処理能力しか必要としない場合でも、プロセッサが最大クロック速度で動作しなければなりません。
- 設定可能なクロック速度と高性能コアの利点をストップモードと組み合わせることにより、消費電力を大幅に低減できます。上記の例から明らかなように、デバイスのクロック速度を所望の性能レベルとマッチさせることによって、エネルギー消費は低減されます。