

# MAXIM Engineering Journal

Volume Sixty-Two

## LETTER FROM THE CEO

2

### アーティクル

セラミックスピーカアプリケーションのアンプに関する考察

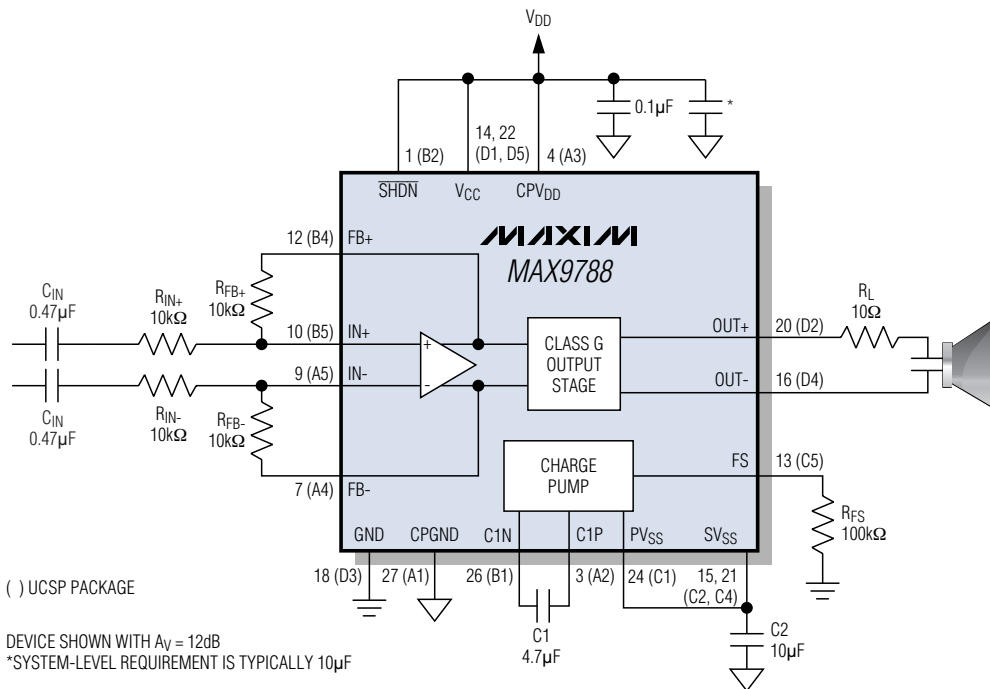
3

暗号鍵の物理的セキュリティに取り組む

7

カメラシステムにおけるアナログビデオのフィルタリング

12



MAX9788を用いたセラミックスピーカアプリケーション回路(5ページを参照)。

# Letter from the CEO

## イノベーションと入手性

過去25年をかけて、Maximはイノベーション企業として努力を認められる存在になりました。アナログおよびミックスドシグナル製品において、当社ほど多くの新製品を出してきた企業はありませんし、現在も、営業日1日当たり平均して1つ以上の新製品を投入し続けています。革新的な考え方はMaximの文化に深く根ざしており、会社のすみずみにまで浸透しています。

「Maximは、製品は素晴らしいけれども、納期がもっとよくなればいいのに」と言われた時期もありましたが、この2~3年、さまざまな対策を施した結果、問題を解消し、高い評価をいただくようになりました。抜本的対策は社外から見えないところで行いました。「お客様の製品納期のことを考えた製品提供を考える」という極めて重要なことです。納期の改善を全社的に推進する重要課題として掲げ、従業員が一丸となってその実現に邁進してきました。今後は、納期厳守をイノベーションと並ぶMaximの企業文化として定着させることが私の目標です。

納期改善については、他にも以下のような対策を行い、目に見える成果をあげました。

- 1) 2007年にウェアハフアップのスペースを80%拡張するとともに、約2億8000万ドルを投じて製造設備と試験設備の増強を行いました。
- 2) 過去9カ月で製造サイクルタイムを30%短縮しました。
- 3) 試作用、量産試作用に小ロット(100個以下)の注文に応えられるように、戦略的に在庫を常時配備しました。その結果、このような注文の97%について、受注後、1週間以内に納入することができるようになりました。
- 4) エンタープライズリソースプランニング(ERP)システムのアップグレードに2500万ドルを投資して、さらに精度の高いプランニングを実現しています。

開発および製造プロセスについては、定期的にあらゆる角度から見直しを行い、製品の仕様策定から設計、製造、テストに要する時間を少しでも短縮する革新的な方法はないかを常に模索しています。

すでに目に見える改善を行いました。やらなければならないことはまだまだたくさんあります。いずれにせよ、Maximの製品が入手しやすくなったと感じていただけているのではないのでしょうか。

今後ともサービス向上に努めてまいりますので、よろしくお願いいたします。



Tunç Doluca  
President兼Chief Executive Officer

# セラミックスピーカアプリケーションのアンプに関する考察

Mark Cherry (Corporate Applications Engineer)

最近のポータブルデバイスでは、電子部品の小型化、薄型化、高効率化が求められています。携帯電話も薄型化が進み、これ以上薄くするためにはダイナミックスピーカの厚さをどうにかしなければならなくなりました。そのため、セラミックスピーカ(圧電スピーカ)がダイナミックスピーカに代わる有力な代替品として注目されるようになりました。セラミックスピーカは薄くコンパクトなパッケージでかなりの音圧レベル(SPL)を提供可能であるため、ボイスコイルを用いた従来型のダイナミックスピーカの代替品となる可能性があります。ダイナミックスピーカとセラミックスピーカの違いは、表1にまとめたとおりです。

セラミックスピーカと従来のダイナミックスピーカでは、異なる出力駆動特性がアンプ回路に求められます。セラミックスピーカの場合、その構造から、大きな容量性負荷を駆動することができる特性が必要とされますし、周波数が高くなったとき、出力電圧を高く維持したまま大電流を供給することができる特性も必要とされます。

## セラミックスピーカの特質

セラミックスピーカは、積層セラミックコンデンサと同じような技術を用いて作られます。そのため、スピーカメーカーは、ダイナミックスピーカよりもスピーカ公差をより小さくコントロールすることができることとなります。構造上の公差が小さいことは、スピーカを等化する上で重要となり、特にユニットによる音響特性の違いを小さくし再現性を高めようとするとき大変重要となります。

セラミックスピーカのインピーダンスは、駆動するアンプから見ると、主成分として大容量を持つRLC回路で等価することができます(図1)。ほとんどのオーディオ周波数帯では、セラミックスピーカは基本的に容量性負荷となります。スピーカが容量性であるということは、周波数が高くなるとインピーダンスが低下することを意味します。図2を見ると、

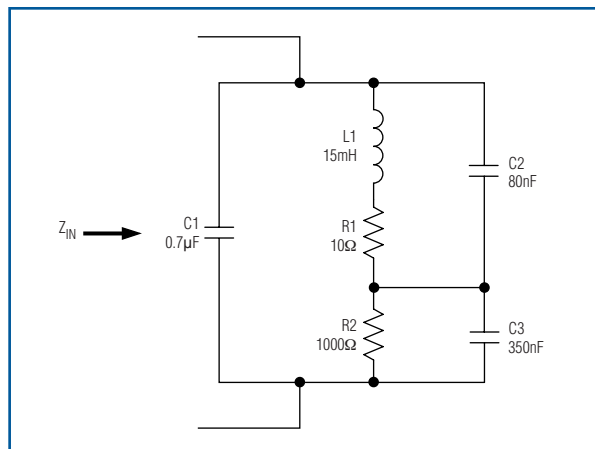


図1. セラミックスピーカのインピーダンスは、主成分として大容量を持っています。

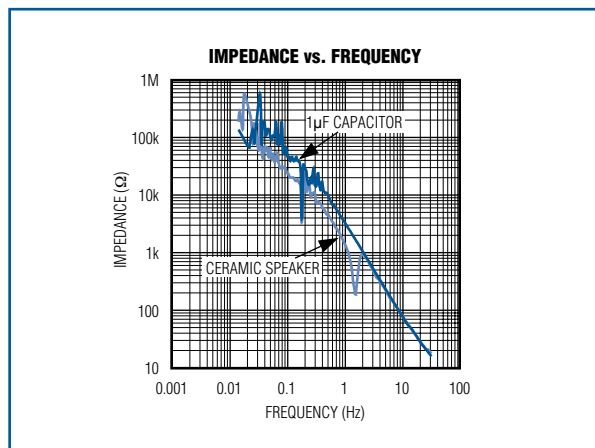


図2. セラミックスピーカのインピーダンスと周波数の関係は1μFコンデンサのそれとよく似ています。

セラミックスピーカのインピーダンスと1μFコンデンサのインピーダンスが周波数に対して同じような挙動を示すことがわかります。このインピーダンスには、スピーカが音を発生する効率が最も高くなる共振点があります。1kHz付近でインピーダンスが急に降下しているところがありますが、そこがその共振周波数です。

表1. セラミックスピーカとダイナミックスピーカのメリットとデメリット

セラミックスピーカ		ダイナミックスピーカ	
メリット	デメリット	メリット	デメリット
<ul style="list-style-type: none"> <li>高効率</li> <li>超薄型</li> <li>製造公差が小さい</li> <li>小さな音響空洞でよい</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高い駆動電圧が必要</li> <li>低周波数応答が劣る</li> <li>容量性負荷である</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>安価である</li> <li>技術的に実証済み</li> <li>スムーズな周波数応答</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>製造公差が大きい</li> <li>効率が悪い</li> <li>高さに制約がある</li> <li>大きな音響空洞が必要</li> </ul>

## 周波数および振幅と音圧との関係

セラミックスピーカの端子に交流電圧を印加すると、変位が入力信号に比例してスピーカ内部の圧電フィルムが変形し、振動します。この圧電フィルムの振動が周囲の空気に伝わり、音が発生します。スピーカに印加する電圧を高くすると圧電素子の変形が大きくなり、音圧が高くなります。つまり、音量が大きくなります。

セラミックスピーカの定格は、通常最大端子電圧で表されます(15V<sub>p-p</sub>程度であることが多い)。最大電圧というのは、セラミック素子が限界まで変形するポイントです。定格電圧を超える電圧を加えても音圧は増加せず、音響出力信号に含まれる歪みが増大します。図3に、セラミックスピーカを最大電圧で駆動したときの出力音圧レベル(SPL)と周波数との関係を示します。

SPLの周波数特性を示すグラフとインピーダンスの周波数特性を示すグラフを比べると、圧電スピーカの効率は自己共振周波数以上の高いSPLを発生させるときに最も高くなることがわかります。

## セラミックスピーカ駆動アンプに要求される条件

セラミックスピーカは、音圧が最大となる最大電圧が14V<sub>p-p</sub>から15V<sub>p-p</sub>となっています。問題は、どのようにすれば、これだけの電圧を1つのバッテリーから得ることができるかということです。1つの方法は、スイッチングレギュレータによってバッテリー電圧を5Vまでブーストするやり方です。5Vの安定化電源が得られれば、ブリッジ接続負荷(BTL)の単一電源アンプを利用することができます。負荷をブリッジ接続すれば、スピーカが受けとる電圧は自動的に倍になります。それでも5Vの単一電源でBTLアンプを使用したのでは、理論的に得られる出力の振幅は10V<sub>p-p</sub>にしかありません。これではセラミックスピーカから最大のSPLを得ることはできません。SPLを高めるためには、電源電圧をさらに高い電圧に安定化する必要があります。

ブーストコンバータでバッテリー電圧を5V以上に高めようとすると、別の問題が発生します。必要となる部品のサイズです。ピークインダクタ電流が大きいということは、コアの飽和を避けるために物理的に大きなインダクタが必要であり、ソリューション全体を小型にするのが難しくなります。大電流に対応する小型インダクタというものもありますが、スピーカを高周波、高電圧で駆動する際に必要な負荷電流を取り扱うためには、もっと飽和電流の大きなコアでなければならない可能性があります。

つまり、セラミック素子を駆動するためには、大電流による駆動と電流制限の回避が必要となります。その理由は、セラミックスピーカは高周波数でインピーダンスが

FREQUENCY CHARACTERISTICS OF SPL  
SAMPLE: MURATA PIEZOELECTRIC SPEAKER  
CONDITION: IN CASE (FRONT EMISSION), 10cm, MONAURAL

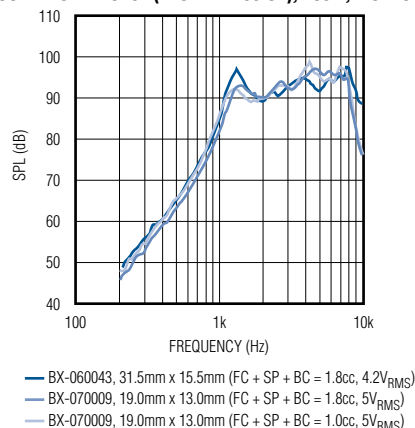


図3. スピーカの定格電圧を超える電圧を印加すると出力信号の歪みが増大します。

低いからです。セラミックスピーカを駆動するためには、電流駆動能力が十分に高く、大量の高周波数成分をスピーカに供給する際にも電流制限モードに入らないですむアンプが必要となります。

図4は、G級アンプのMAX9788を使ったアプリケーション回路です。G級アンプには、高電圧と低電圧の2つの電圧レールがあります。出力信号が小さいときには低電圧レールが使用されます。出力信号が高い電圧振幅を要求すると、高電圧レールが出力段に切り替わります。電源電圧が低い場合、G級アンプは、出力信号が小さいとき、AB級アンプよりも高い効率を発揮します。同時に高電圧レールも持つことから、G級アンプはピーク過渡変化も処理することができます。

図4に示すMAX9788は、内蔵のチャージポンプで、V<sub>DD</sub>を反転した負電源を生成します。この負電源は、出力信号が高電圧レールを必要とするときのみ、出力段に適用されます。この結果、AB級アンプとブーストコンバータの組合せという従来のやり方よりも、このデバイスは高い効率でセラミックスピーカを駆動することができます。

なお、スピーカメーカーからは、セラミックスピーカには必ず固定抵抗器(R<sub>L</sub>)を直列に入れることが推奨されます(図4)。この抵抗は、信号に高周波数成分が非常に多いとき、アンプの電流出力を制限する働きをします。アプリケーションによっては、スピーカに供給されるオーディオ信号の周波数応答が帯域制限可能であれば、固定抵抗器は必ずしも必要ではありません。そのような場合、スピーカがショートしているようにアンプ側から見えなくなるからです。

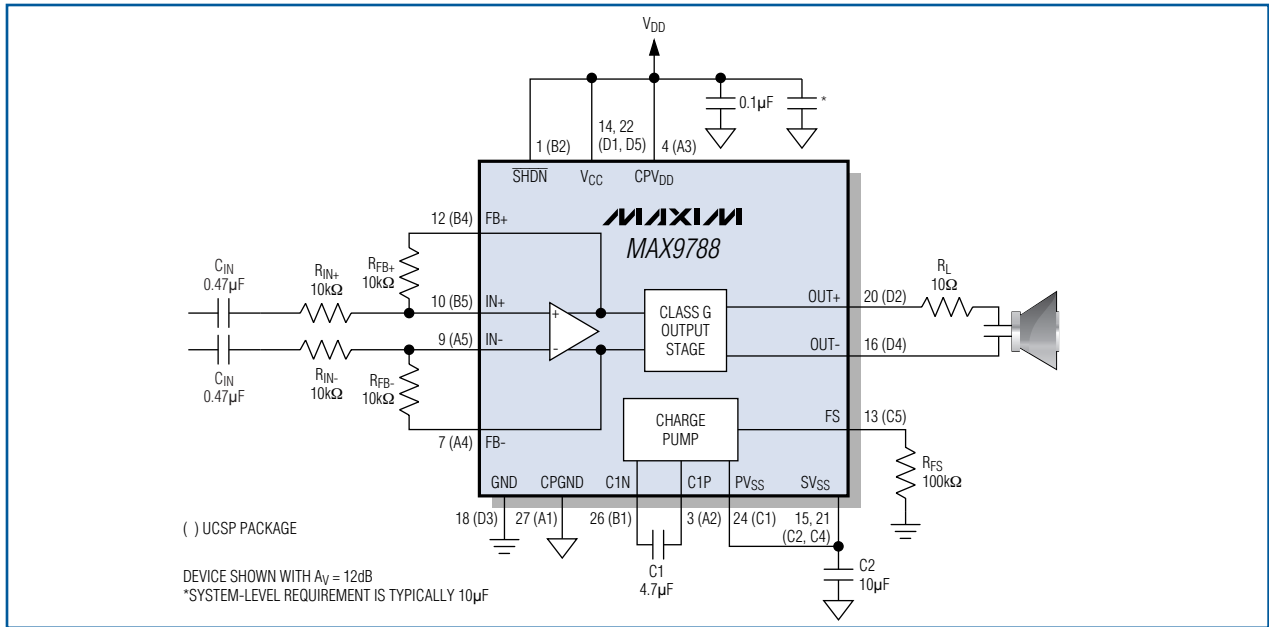


図4. MAX9788を用いたセラミックスピーカアプリケーション回路

最近のセラミックスピーカは、静電容量が1µF程度となっています。図4に示すスピーカのインピーダンスは、8kHzで20Ω、16kHzで10Ωです。今後はさらに大きな静電容量を持つセラミックスピーカが登場し、同じ出力周波数に対して今より大きな電流を供給する能力がアンプに求められる可能性もあります。

### セラミックスピーカとダイナミックスピーカの効率比較

従来のダイナミックスピーカの場合、効率は簡単に計算することができました。ボイスコイルは、固定抵抗器と高インダクタンスとの直列接続という等価回路で表せるからです。負荷に供給される電力(P)は、オームの法則とスピーカの電気抵抗値から、 $P = I^2R$ あるいは $P = V \times I$ です。スピーカに供給される電力の大半は、スピーカコイルで熱として放出されます。

容量性の性質を持つセラミックスピーカは、電力を消費しても放出する熱量は多くありません。セラミックスピーカの場合、「ブラインド」電力が放出されます。放出量はセラミック素子の損失係数によって決定されますが、量的には小さなものとなります。ブラインド電力放出時の発熱量はごく少ないものになります。ブラインド電力は、 $P = V \times I$ のように簡単には計算できず、次式が必要となります。

$$P = (\pi f C V^2) \times (\cos\phi + DF)$$

ただし、

C = スピーカの静電容量

V = 駆動電圧実効値

f = 駆動電圧の周波数

$\cos\phi$  = スピーカを流れる電流とスピーカに印加された電圧の位相角

DF = スピーカの損失係数：非常に小さく、信号の周波数とセラミックスピーカのESRによって決まる

電圧と電流の位相角は理想的なコンデンサでは90°であり、セラミックスピーカはほとんどの場合容量性であることから、 $\cos\phi$ はゼロとなり、セラミックスピーカの容量性部分における消費電力はゼロになります。現実にはセラミック材料や誘電体は非理想的であり、スピーカにかかる電圧はスピーカを流れる電流よりも必ずしも90°ではない位相角で遅れが生じます。現実の位相シフトと90°という理想的な位相シフトとのわずかの差が損失係数(DF)となります。

セラミックスピーカのDFは、理想的コンデンサに小さな等価直列抵抗(ESR)を直列接続した等価回路で表すことができます。この直列抵抗は、アンプとスピーカの間にご注意ください。DFは、対象周波数における容量性リアクタンスに対するESRの比となります。<sup>2, 3</sup>

$$DF = R_{ESR} / X_C$$

たとえば、静電容量が1.6 $\mu$ FでESRが1 $\Omega$ のセラミックスピーカを5V<sub>RMS</sub>で駆動する場合、5kHzの出力のブラインド電力は次式で表されます。

$$P = (\pi \times 5000 \times 1.6 \times 10^{-6} \times 5^2) \times (0 + 0.05) = 31.4 \text{ mW}$$

## 真の消費電力

ダイナミックスピーカとは異なり、セラミックスピーカは有効電力を熱として放出することはありませんが、駆動アンプの出力段およびアンプ-スピーカ間の外付け抵抗(R<sub>L</sub>)で熱が発生します(図4)。この外付け抵抗を大きくするとアンプで消費される電力を小さくすることができますが、低周波応答が劣化します。

セラミックスピーカに10 $\Omega$ の直列抵抗を入れると、全体的な負荷に対してブラインド電力の割合は小さいことがわかります。放出される電力のほとんどが外付け抵抗となり、アンプから供給しなければならない電力と周波数との関係は図5のグラフのようになります。

低周波数の応答を改善したい場合、外付け抵抗を小さくする必要がありますが、そうするとアンプ出力段での電力損失が大きくなります。なお、アンプ出力段で放散される電力は、アンプの効率によって決まります。アンプで電力損失を大きく取るためには、D級やG級アンプなど、高効率のソリューションにしなければなりません。負荷は直列抵抗であり、負荷ネットワークにおける電力消費はスピーカ外のこの抵抗で発生します。アンプの効率が100%であったとしても、スピーカを駆動するはずの電力の一部が直列抵抗で消費されます。

図5に示す例では、5kHzの周波数において負荷に供給される総電力は629mWとなります。アンプの効率が53%の場合、アンプで558mWが放出されます。アンプで放出しなければならない電力量によって、アプリケーションで使用可能なパッケージのサイズが決まります。高周波数の

サイン波でセラミックスピーカを駆動したい場合には、電力消費を大きくする必要があります。

## まとめ

ポータブル機器の薄型化が進行しており、薄型のセラミックスピーカへの要求が高まっています。セラミックスピーカは従来のダイナミックスピーカとは異なり、設計時に検討しなければならないことも異なります。セラミックスピーカは容量性であり、対象とする周波数の全範囲で高電圧を維持することができるように、出力電圧が高く、大きな出力電流を流すことができるアンプが必要です。セラミックスピーカを駆動するアンプには、複合負荷へブラインド電力と有効電力を供給する能力が求められます。小型ソリューションと低コストを実現するために、アンプには高い効率が求められます。このため、従来、一般的に用いられてきたAB級とは異なるアンプトポロジを採用しなければならないのです。効率の高いソリューションとしてG級アンプやD級アンプの採用が広がっていますが、中でもコストと部品点数と効率の最適なバランスを得られるのはG級アンプとなります。

## リファレンス

1. “Blind Power Dissipation in a Piezo Ceramic Load (for a Sine Wave),” Sonitron NV. (英文のみ)
2. “Piezoelectric Transducers: Distributed Mode Actuators,” National Semiconductor, [www.techonline.com/learning/techpaper/193600345](http://www.techonline.com/learning/techpaper/193600345) (英文のみ)
3. “Application Notes for Multilayer Ceramic Capacitors,” Kemet Electronics, [www.kemet.com/kemet/web/homepage/kechome.nsf/weben/6FB56FCB5EBB9053CA2570A500160913/\\$file/F3101ECerLdPerfChar.pdf](http://www.kemet.com/kemet/web/homepage/kechome.nsf/weben/6FB56FCB5EBB9053CA2570A500160913/$file/F3101ECerLdPerfChar.pdf) (英文のみ)

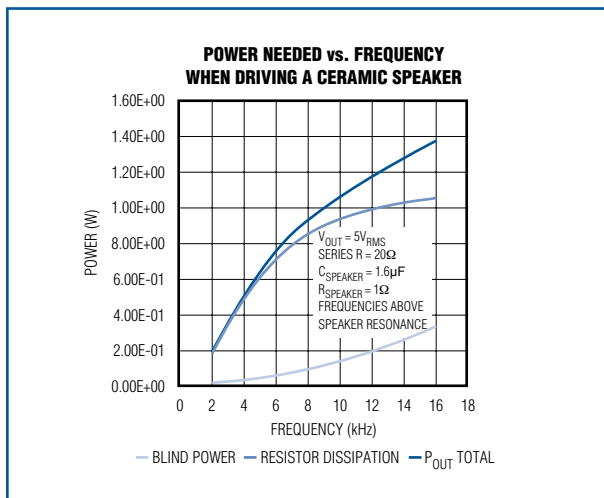


図5. セラミックスピーカ負荷全体においてブラインド電力が占める割合は非常に小さく、電力の大半は外付け抵抗で放出されます。

# 暗号鍵の物理的セキュリティに取り組む

Swati Joshi (Business Manager)

セキュアな通信の基本は暗号鍵の保護にあります。大規模な暗号鍵はコンピュータによって力づくで行うコードハッキングに対する防御として一定の効果を持っていますが、このような方法には、同程度に重要である物理的セキュリティについての対処が含まれていません。適切な物理的セキュリティを得るためには、いくつかの問題を考慮する必要があります。たとえば、ランダムな鍵を生成する物理的メカニズム、許可された主体間でやりとりされる鍵を電子的にのぞき見するのを物理的に防止する設計、不正な物理的プローブや機械的プローブから鍵を守る安全な保管方法などを検討しなければなりません。

Maximのセキュア監視回路DS36xxファミリーは、パッケージデザインから外部センサインタフェース、内部回路のアーキテクチャまでさまざまな機能を有しており、軍用電子機器設計者にこうした保護機能すべてを提供します。これらのデバイスは、ポータブルな軍用コンピュータや情報通信システム分野において、昔から使われている製品も今後登場する製品の両方について、セキュリティ要件への対応を容易にし、図1に示すように非常に幅広い多様なアプリケーションをカバーします。

## 電子データのセキュリティ要件

暗号モジュールには、機密扱いされていなくてもデリケートな情報については遵守しなければならないとする米国政府の要求に、米国連邦情報処理規格(FIPS)という規格があります。発行はNIST (National Institute of Standards and Technology)です。FIPS 140-2には、4段階のベーシックレベルが定められています。

- セキュリティレベル1:物理的セキュリティ機能は不要 (NIST規格に従った暗号アルゴリズムが実装されていればよい)
- セキュリティレベル2:タンパーが検出できる物理的セキュリティが必要
- セキュリティレベル3:耐タンパー性を持つ物理的セキュリティが必要
- セキュリティレベル4:保護エンベロープとなる物理的セキュリティが必要

高度なセキュリティが要求される軍用通信アプリケーションでは、米国国家安全保障局(NSA)のタイプ1認証規格も満足する必要があります。NSAの認証を受けた機器だけが、米国政府の暗号化された極秘情報を取り扱うことができることされ、その認証を得るためには以下のようなテスト項目や分析項目を含む厳格な手続きをパスする必要があります。

- 暗号セキュリティ
- 機能的セキュリティ
- 耐タンパー性
- エミッションセキュリティ
- 製品の製造と流通におけるセキュリティ

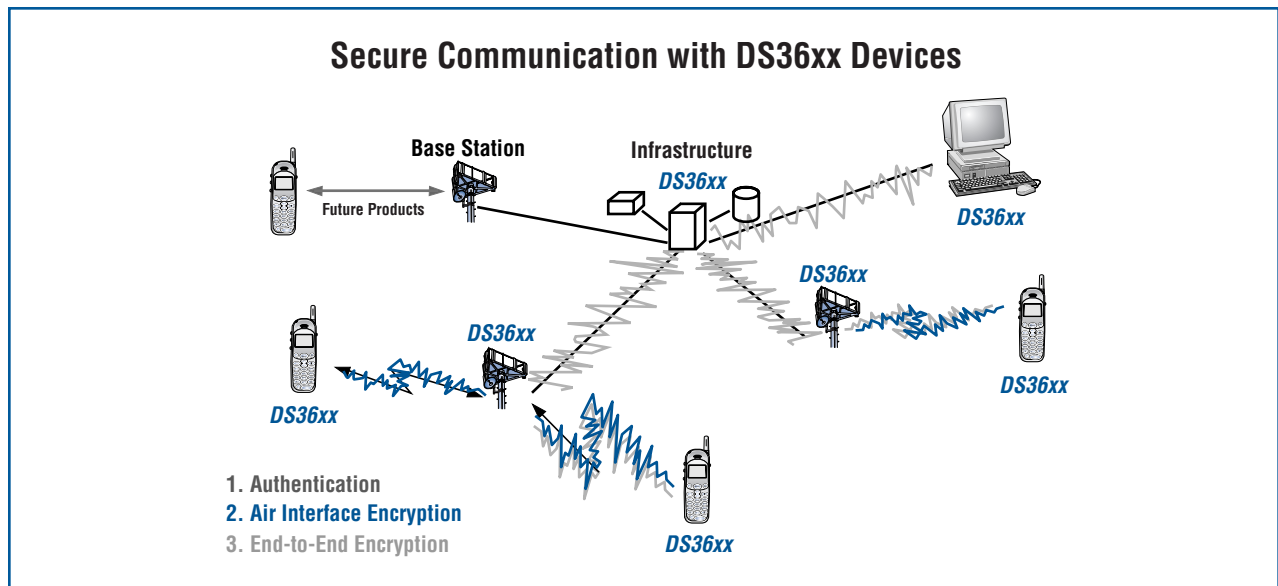


図1. DS36xxデバイスは、セキュア通信やクライアント認証など、現在および未来の軍用・国土安全保障用セキュリティコミュニケーション機能を幅広くカバーしています。

このようなガイドラインの遵守が求められるアプリケーションとしては、まず、戦闘機用戦術通信プロトコルのWIN-T (Warfighter Information Network-Tactical)で使用する通信機器が挙げられます。WIN-Tはデータ、音声、および動画まで、幅広い種類の通信をサポートします。広帯域で信頼性の高いモバイル通信を利用することによって、どのような場所からでも戦闘機はネットワークに接続された状態を維持することができます。WIN-Tでは、無線LAN (WLAN)、VoIP (Voice over Internet Protocol)、第三代携帯電話/衛星技術など、一般的な通信技術が利用されます。WIN-Tは、戦術地上ユニット内に位置する戦闘機をDoD (Department of Defense : 米国国防総省)の世界的ネットワーク経由で指揮官と結びます。

軍用アプリケーションでは当然のことですが、WIN-Tにおいても情報セキュリティが非常に重要です。WIN-Tでは、正規のユーザがネットワークへ自由にアクセスできるようにするとともに、不正な攻撃は検出し拒否されるようにアーキテクチャを構築しなければなりません。そのために、WIN-Tのセキュリティは、あとから追加するのではなく、最初から内蔵しておく必要があります。そのようなアプローチであれば、音声通信やデジタルデータのネットワーク経由での安全なやりとりが可能となります。

従来、システム開発は、短時間での配備を主眼とした設計となっており、多くの場合、セキュリティ機能はフィールドでのアップグレードという形で実装されていました。この背景には、セキュリティ機能を内蔵すると大幅なコストアップになるとともにスケジュール遅延の原因にもなるという考え方がありました。しかし最近では、高い相互運用性と接続性、そして、FIPS 140-2、NSA、およびWIN-Tといった規格準拠への対応を確保するために、すべての軍用通信アプリケーションに最初から高いレベルのセキュリティが求められるようになりました。セキュリティと侵入防止は、他の軍用アプリケーションでも従来以上に重視されるようになりました。たとえば、General Dynamics®はSecure Computing®とともに、戦闘車両で使用するMESHnet Firewallの開発を行いました。

結果的に、すべての該当規格を満足していない状態で新しい軍用情報通信システムやそのコンポーネントがリリースされることはなくなりました。現在の軍用通信アプリケーションは、少なくとも、FIPS 140-2のセキュリティレベル3と4を満足しなければなりません。さらに高レベルのアプリケーションにおいては、設計時に、NSAのタイプ1要件と新しいWIN-T要件のいずれか、あるいは両方に準拠する必要があります。通常、軍用アプリケーションに対しては、FIPS 140-2のセキュリティレベル3以上の認証が求められます。

## セキュリティ要件に適合

米国政府が規定するセキュリティ要件に対応しようとすると、システム設計者は複雑なタスクをこなす必要があります。セキュリティ関連の規格というものは、規格の策定時に想定した脅威に変化があるたびに変更される可能性がある(変更されるべき)ものであり、基本的には時間の経過とともに厳しくなっていくものです。

このように変化し続けるセキュリティ規格に対応してゆくのは、設計にかなりの問題をもたらすことになります。設計プロセスは、要求されるセキュリティレベルと設計するセキュア製品の最終的な目的に応じて決まるからです。たとえば暗号化された鍵を読み取る手法が高度なものとなっているため、単純に鍵を再暗号化してもセキュリティが大幅に向上することはありません。そのため、そのような手法から暗号鍵を保護するためには、物理的セキュリティの強化を含むさまざまな対策を組み合わせる必要があります。

FIPS 140-2 (セキュリティレベル3あるいは4)、NSAタイプ1、あるいはWIN-Tを満足するセキュアな軍用システムを設計する場合、主電源がない状態でも包括的なタンパー防止機能を提供するコンポーネントを組みこむことが重要です。図2に示すDS3600など、MaximのDS36xxファミリの製品は、バッテリー駆動時にも(主電源が停止すると自動的にバッテリー駆動に切り替わる)タンパー行為をアクティブに検出し、暗号鍵と重要データの両方について安全を確保する高集積ソリューションとなります。電源モニタとバッテリースイッチがオンチップで用意されており、電源の状態にかかわらずタンパー検出メカニズムが停止することはありません。主電源は常にモニタリングされており、ロースレッシヨルドよりも下がると、その瞬間、バックアップバッテリーへ自動的に切り替わり、内部と外部の保護回路の両方が動作し続けられるようにします。そのため、主電源が失われてもタンパー検出機能が停止することはありません。

FIPS 140-2 (セキュリティレベル3と4)や、NSAタイプ1およびWIN-Tの要件を満足するためには、タンパー検出用コンポーネントに外部センサを接続し、保護すべきデータが記録されているデバイスの回りにセキュリティ境界となる保護エンベロープを形成する必要があります。DS36xxシリーズの場合、外部センサを組み合わせることによって、ユニークかつ柔軟なやり方で複層のセキュリティを追加し、政府機関が定めるさまざまな要件を満足することができます。

これらの各種政府規制の準拠に対して、セキュア監視回路のDS36xxシリーズであれば、アナログ電源電圧、デジタル信号、および抵抗メッシュ型保護センサグリッドを簡単かつ同時にすべて監視することができます。また、DS36xxデバイスはいずれもチップスケールボールグリッド



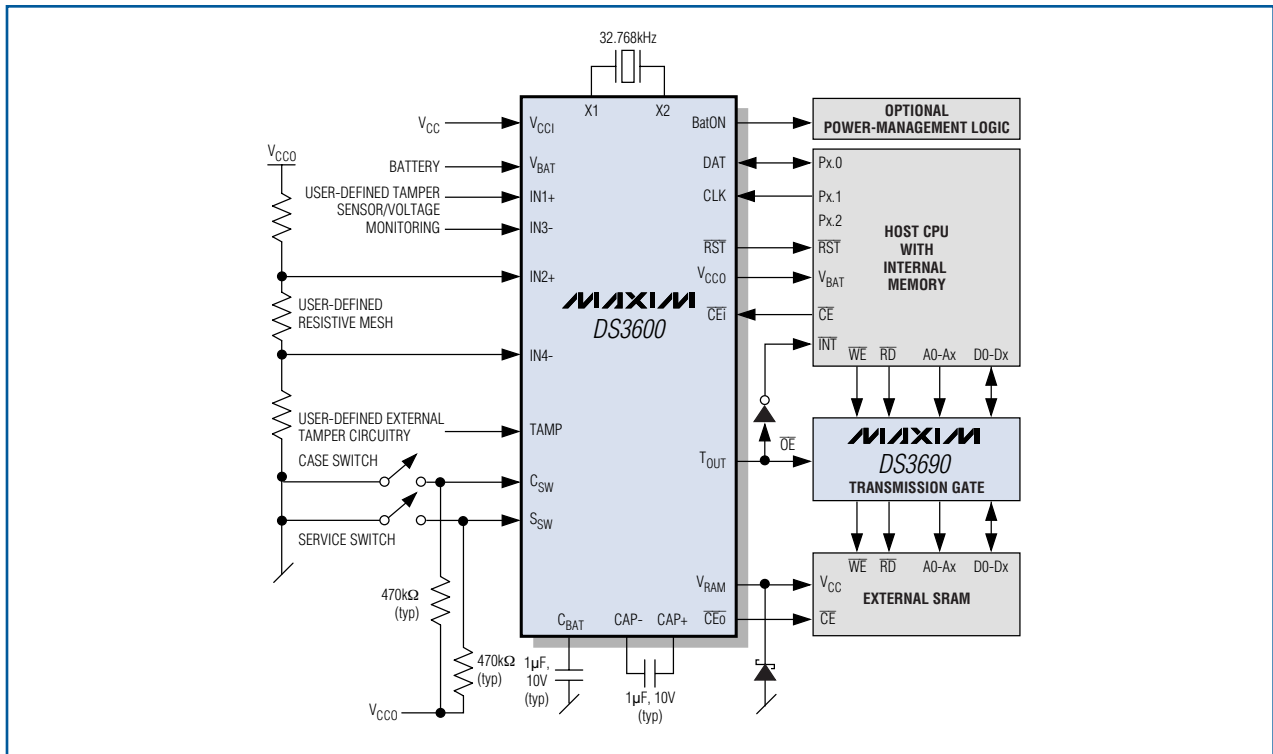


図2. DS3600セキュア監視回路は、さまざまな機能とメカニズムの組合せによって、タンパーを検出し、内部メモリに記憶されている暗号鍵や外部SRAMに記憶されている重要データなど、バッテリーバックアップされた揮発性メモリの内容を保護します。

アレイ(CSBGA)パッケージとなっています(図3参照)。これらのパッケージは、マウント後、端子へのアクセスを厳格に制限することによって、制御信号やデータ信号を保護する追加のパッシブな物理的セキュリティとして機能します。

### 内蔵セキュリティ機能

DS36xxシリーズは、さらなる保護レイヤとしてタンパー検出メカニズムも内蔵しています。これらの内部メカニズムは、カスタマイズされた外部タンパー検出センサとのインターフェースの役割になります。内蔵のタンパー検出メカニズムは、オンチップ温度センサ、ケーススイッチモニタ、電源モニタ、バッテリーモニタ、およびオシレータモニタがあり、タンパーの有無を連続的に監視することができます。また、この監視機能は、バッテリー電源動作中も含め、常にアクティブに保たれます。

外部メカニズムと同様に、内蔵メカニズムも、ユーザが定義したスレッシュホールドか、出荷時に設定されたスレッシュホールドを越えるとトリガがかかります。たとえば、NSAなどの認証団体やFIPSやWIN-T規格の認証団体が定める必要条件を満足しようとするとき、内蔵温度センサでサブストレートの温度を監視するというやり方が考えられます。温度が上限を超えたり下限を下回ると、デバイスが耐タンパー機能を起動します。



図3. DS36xxファミリのCSBGAパッケージは、デバイスを回路基板に取り付けるとI/O信号へのアクセスを制限し、パッシブな保護機能として働きます。

DS36xxデバイスには、瞬時的な温度を計測する以外に、別の温度監視機能があります。これは変化率検出器と呼ばれ、サブストレート温度の変化速度を監視します。温度が急上昇あるいは急降下するとデバイスのタンパー応答機能を起動し、高度な手法によるデータリカバリ技術に対して保護を提供します。

文献には、保護されたSRAMからデータを回復する方法として、電源遮断前にデバイスに液体窒素をかける方法が紹介されています。こうすると、ミリ秒単位で、電源のない状態でSRAMセルのデータ保持が延長されます。しかし、DS36xxファミリ製品は、この行為をタンパーイベントとして解釈し、極低温によるメモリ保持効果が現れる前にメモリ内容を消去します。メモリは物理的配線によって高速クリアが可能となっており、メモリ配列全体の完全リセットを100ns以下で行います。この機能は、インターロックブリーチなど、他のタンパーイベントからトリガしたり、デバイスのI<sup>2</sup>C/SPI™対応インタフェースへ直接コマンドを送信することによってトリガ可能です。

DS36xxシリーズのデバイスには、ノンインプリンティング鍵メモリと呼ばれる独自の機能も搭載されています<sup>†</sup>。ノンインプリンティング鍵メモリは、SRAMメモリセルを構成するデバイスの酸化膜層に電荷が蓄積されたり欠乏したりする(保存内容によるか)特性によって生じるセキュリティリスクに対処します。このような従来のメモリセルに長期間データを記憶させておくと、酸化膜層にストレスがかかり、最終的にはそこに記憶されていたデータの痕跡が残ってしまいます。こうなると、セルをクリアしても記憶されていたデータの読み取りが可能になります。

この酸化膜ストレスの現象を取り除くために設計し、開発されたのがノンインプリンティング鍵メモリ技術です。デバイスに搭載されているのはごく普通のバッテリーバックアップされたSRAMメモリですが、これを継続的に補充し、完全な状態に保ちます。そのため、タンパーイベントが検出されたり、直接コマンドによってメモリがクリアされると、全メモリがクリアされ、そこに存在したデータの痕跡は一切なくなります。この機能を活用することによって、軍隊や政府関連機関向けの製品を設計するにあたり、厳重な保護が必要な暗号鍵を安全に保存することができます。

## タンパーイベントに対する応答

DS36xxデバイスは、ここまで述べてきたすべてのタンパー入力とタンパーイベントを継続的に監視します。内部あるいは外部のメカニズムでタンパーイベントを検出すると、すぐにタンパー応答が発生します。タンパーイベントがあると、まず、タンパーのソースの特定を行います。タンパーイベントの原因となっている状態が解消されるまで、

タンパーラッチは凍結されます。原因が解消されると、リセットされます。DS36xxデバイスがタンパー応答として行う一連の動作の概要を表1に示します。

## セキュアな軍用アプリケーションの構築

物理的セキュリティは記録されている暗号鍵の保護に必要とされるだけでなく、暗号鍵の生成時にも必要です。つまり、同じ機器によって、あるいはそっくりの複製品によって鍵の不正コピーが作成されないようにデジタル暗号鍵は生成されなければならないのです(同じ機器で不正コピーを作られてしまうと、DS36xxファミリによってデータ記録をセキュアとしても意味がなくなってしまいます)。

DS36xxデバイスに内蔵されている乱数発生器(RNG)機能は確定的な擬似ランダムアルゴリズムで、シードには、オンチップで生成される2つの自然乱数を用いています。この機能から連続的に出力されるビットストリームをホストCPUで処理することによって、認定ソフトウェアRNG機能のシードとすることができます。また、各DS36xxのセキュア監視回路は、出荷時に固有のシリコンシリアル番号が書き込まれており、I/Oポートから読み出すことができます。シリアル番号がシリコン自体に書き込まれているため、これを読み出せば、最終製品を識別することができます。

最新のDS36xxデバイスには、発生したタンパーイベントに応じて特定のメモリセルを消去する機能も内蔵されています。これは消去階層と呼ばれる機能で(そのデバイスは表2を参照)、機器の完全性が保たれているようなアプリケーションに便利です。すべての機能が使えらるわけではない場合もありますが、タンパー発生後も機器は使い続けることができるためです。このような例としては、軍用セキュア無線機をはじめとする通信機器など、タンパーイベント後もある程度使えないと困るものが挙げられます。

表1. タンパーイベント検出後にDS36xxデバイスが取る一連の動作

ステップ	アクション
1	内部の暗号鍵を即座に、完全に、そしてアクティブに消去する(暗号鍵がある場合)
2	外部RAMを消去する(外部RAMがある場合)
3	タンパーラッチのレジスタにタンパー入力ソースの状態を記録する
4	システムプロセッサに警告を発するためにタンパー出力がアサート
5	タンパーイベントのタイムスタンプレジスタにタンパーイベントの発生時刻を記録する

防御用アプリケーションは高レベルのデータセキュリティを提供するだけでなく、運用時にも保管時にも大きな温度変化にも耐えられる必要があります。DS36xxの各デバイスは基本的に一般的な動作環境で高いセキュリティを実現することを念頭に設計されていますが、最近の製品の中には軍用温度範囲にかなり近いレベルの動作温度をサポートしたものもあります(フルの軍用温度範囲が-55℃～+125℃であるのに対し、一部DS36xx製品は-55℃～+95℃に対応しています)。

## まとめ

表2に示すように、セキュア監視回路のDS36xxファミリは機能が豊富で、暗号鍵の生成と保管、タンパーイベントの監視、タンパーイベント検出時のアクティブかつ完全な鍵破壊などを行うシステムを構築することができます。外部入力も用意されているため、セキュリティレイヤを追加してFIPS、NSA、およびWIN-Tで規定された要件を満足することができます。

表2. DS36xxの各デバイスと主な特長

品名	I/O	監視アナログ 電圧数	監視デジタル 入力数	動作温度 範囲(℃)	内蔵鍵メモリ (バイト)	外部メモリ 制御	乱数 発生器	過電圧 モニタ	バッテリー モニタ	消去階層
DS3600	3線	4	1	-40～+85	64	○	○	—	○	—
DS3605	I <sup>2</sup> C	4	1	-40～+85	N/A	○	○	—	○	—
DS3640	I <sup>2</sup> C	5	3	-40～+85	1k	—	○	○	○	—
DS3641	4線	5	3	-40～+85	1k	—	○	○	○	—
DS3644*	I <sup>2</sup> C	12	4	-55～+95	1k	○	○	○	○	2レベル
DS3645*	I <sup>2</sup> C	12	4	-55～+95	4k	○	○	○	○	—
DS3650	4線	2	N/A	-40～+85	N/A	—	—	○	○	—
DS3655*	I <sup>2</sup> C	N/A	4	-40～+85	64	—	—	—	—	—
DS3665*	SPI	12	4	-55～+95	8k	○	○	○	○	4レベル

General DynamicsはGeneral Dynamics Corporationの登録商標です。  
Secure ComputingはSecure Computing Corporationの登録商標です。  
SPIはMotorola, Inc.の商標です。

†特許出願中

\*開発中。入手性についてはお問い合わせください。

# カメラシステムにおけるアナログビデオのフィルタリング

Ben Nader (Strategic Applications Engineer)

ビデオシステムには、一般に、ビデオエンコーダのビデオ出力ラインにローパスフィルタが入っています。このフィルタはビデオ信号用D/Aコンバータ(DAC)の出力から高周波ノイズを除去し、ビデオ信号の立上りエッジと立下りエッジをスムーズにする働きを担っています。従来は、ディスクリートのパッシブフィルタが広く使用されていました。これに対して最新のビデオ用サブシステムでは、内蔵のフィルタアンプがビデオDACの後に続き、ビデオ信号のクリーンアップと増幅を行うようになっています。この

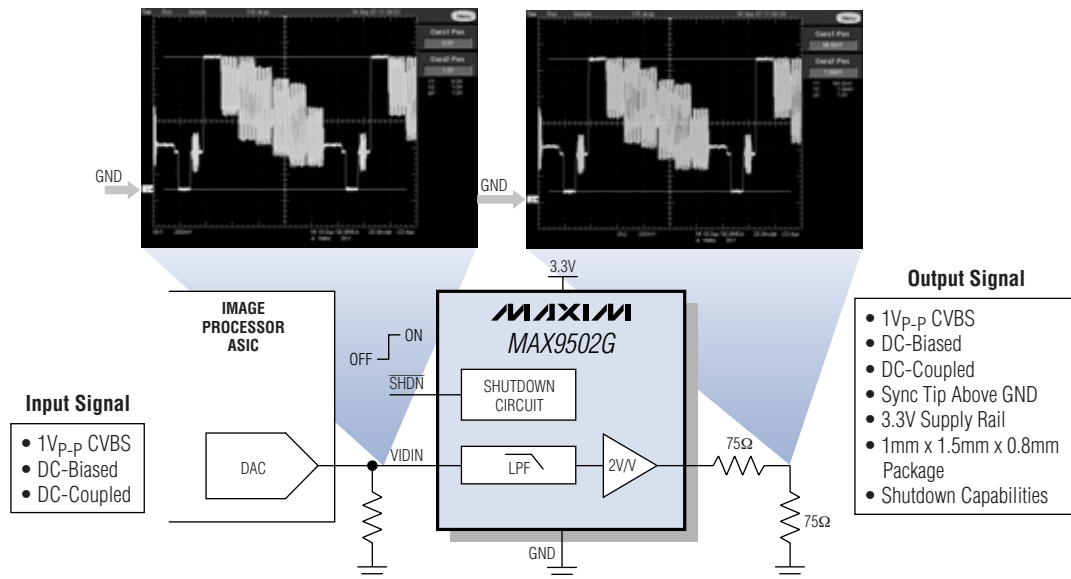
アーティクルでは、さまざまなビデオアプリケーションに適したMaximのさまざまな高集積ビデオフィルタアンプについて説明します。

ビデオカメラに搭載されたビデオDACの出力としてもっとも広く普及しているのは、コンポジットビデオ(CVBS)信号とY/C信号です。このアーティクルでは、DAC出力における信号のDCレベル、信号振幅、出力の(ACまたはDC)結合の方法が異なる8種類のフィルタアンプ構成(例1~例8)を紹介します。高集積ビデオフィルタでは、一般に5Vか3.3Vの電源が使用されますが、消費電力の少ない例(例6と例7)では、1.8Vや2.5Vでビデオフィルタアンプを駆動することができます。これらの例で使用されているフィルタアンプ(MAX9509)は、Maxim特許のDirectDrive™技術<sup>†</sup>を採用しており、8V/Vの内部固定利得、2V<sub>p-p</sub>のビデオ信号を出力することができます。

以下に紹介する8つの例は、いずれも、その出力を75Ω負荷で測定しています。したがって出力グラフが1V<sub>p-p</sub>であれば、高集積フィルタアンプの出力は2V<sub>p-p</sub>ということになります。また、ソースには、75% TV NTSCのカラーバー信号を使用しました。

## 再生フィルタでビデオDACとビデオアンプを接続

例1

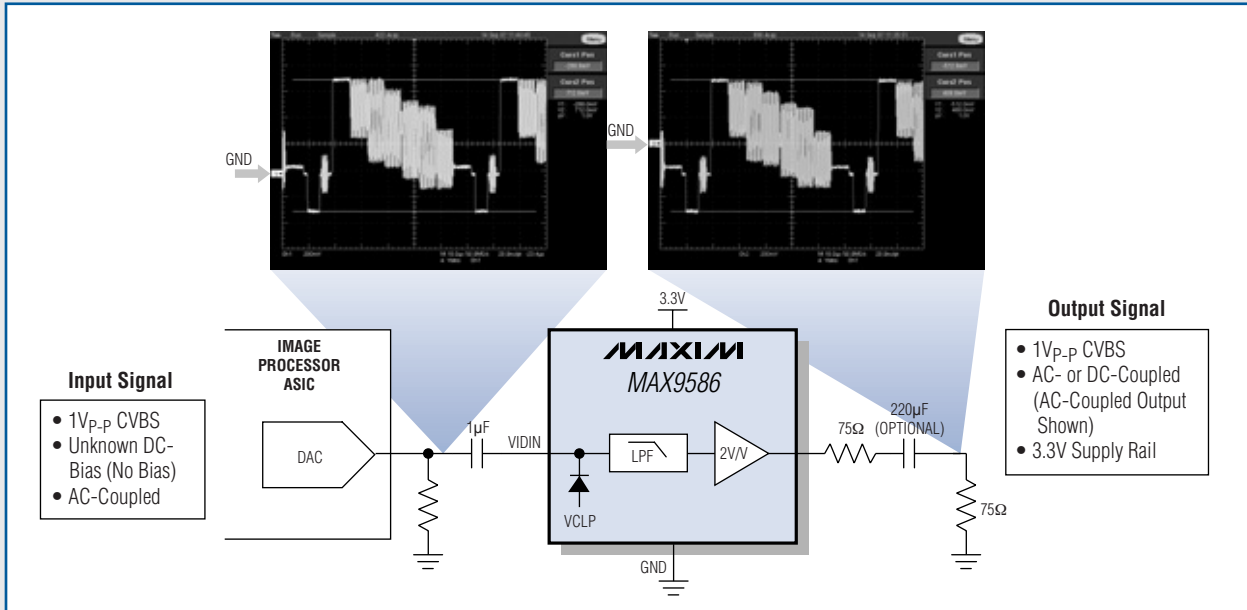


注：AC結合コンデンサがビデオ出力ラインに必要となる場合、このソリューションは推奨されません。そのような状況では、他のソリューションを検討してください。

例1では、ビデオDACの出力は、再生フィルタを内蔵するビデオアンプMAX9502Gに接続されています。DACのビデオ信号出力には、シンクチップがほぼグランドとなるようにバイアスをかけます。MAX9502Gではこの信号のフィルタリングと増幅を行い、2V<sub>p-p</sub>のDCバイアス信号とします。MAX9502Gの出力には、シンクチップがグランドから約300mV高くなるようにバイアスをかけます。出力に75Ω分周器がセットされているため、負荷側から見たシンクチップ値は150mVとなります。MAX9502Gは高集積なソリューションで基板面積に占める割合が小さく、ポータブルシステム設計での省スペース化に貢献します。

## ビデオDACからAC結合でビデオアンプへ出力

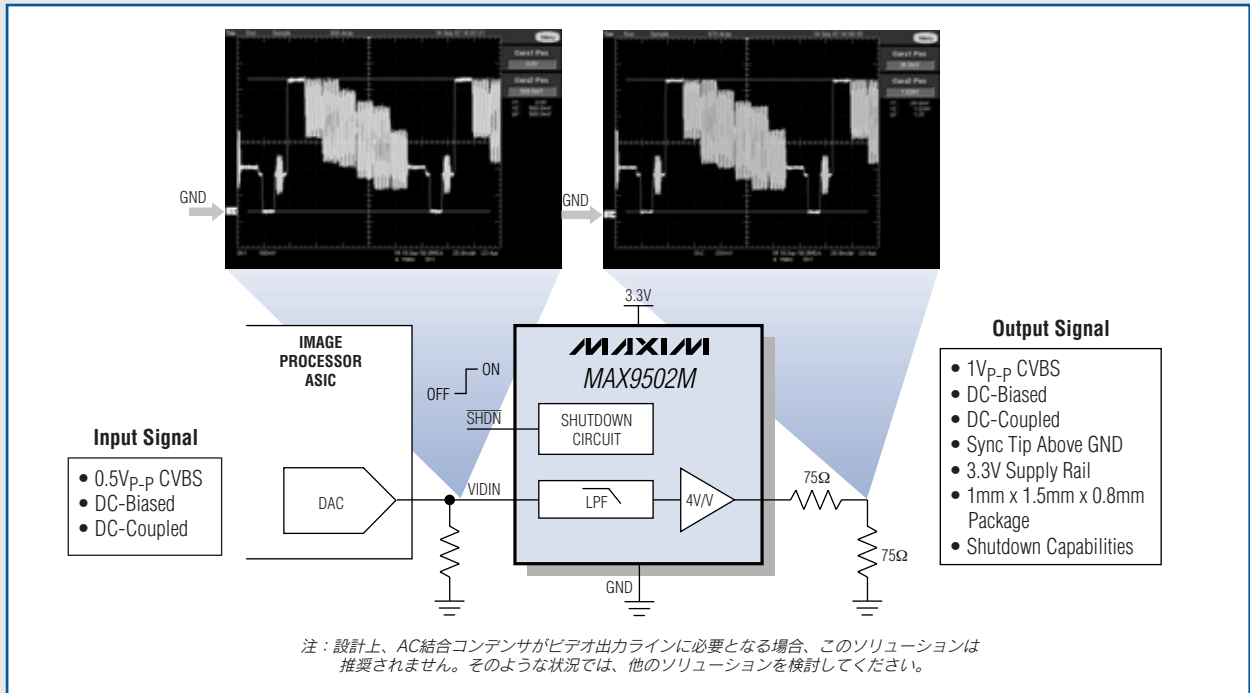
例2



例2では、ビデオDACからAC結合でビデオ信号をビデオフィルタアンプMAX9586へと出力しています。信号はAC結合とし、シンクチップはグランド以下としなければならない単一電源アプリケーションに適したソリューションです。ただし、出力側ビデオのAC結合には、ブラックレベルがグランドにならず、ビデオ信号の内容が変化するとブラックレベルも変化してしまうという問題があります。MAX9586は、2つのDC結合ビデオ負荷、または1つのAC結合150Ω負荷を駆動することができます。

## 例1に0.5V<sub>p-p</sub>、DCバイアス信号を追加

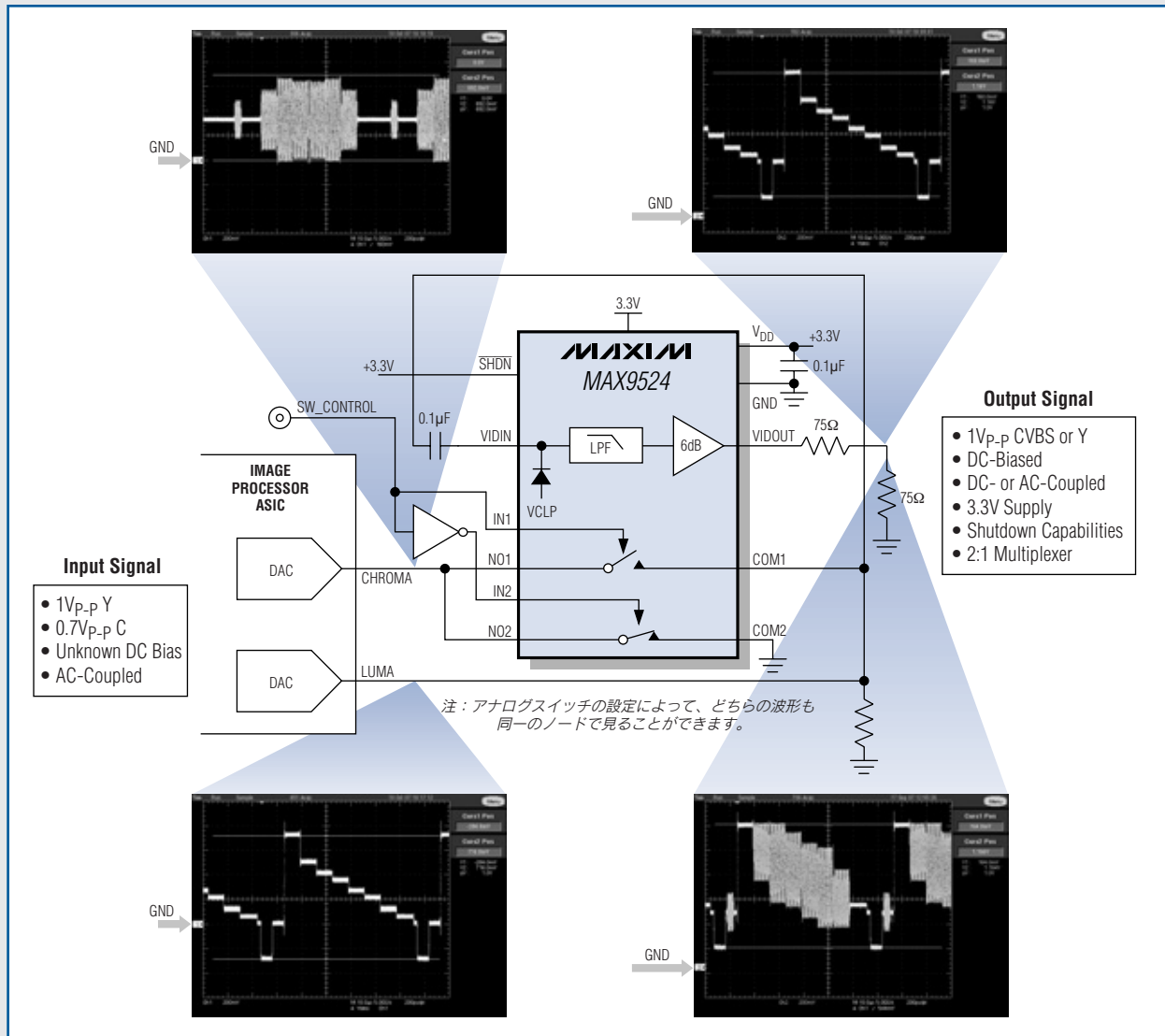
例3



例3は例1とよく似ていますが、例3は、DACが0.5V<sub>p-p</sub>、DCバイアス信号しか出力することができないという違いがあります。このような場合、利得が12dB固定のMAX9502Mが適切なソリューションとなります。負荷側のビデオ信号にはDCオフセットがかかっており、シンクチップはグラウンドから150mV高くなります。なお、DACのビデオ信号出力もグラウンドより高くなければなりません。MAX9502Mは、1つの2V<sub>p-p</sub>のビデオ信号をグラウンド接続された150Ω負荷に対して駆動することができます。

## ビデオDACから1本の出カラインでCVBS信号やY信号を出力

例4

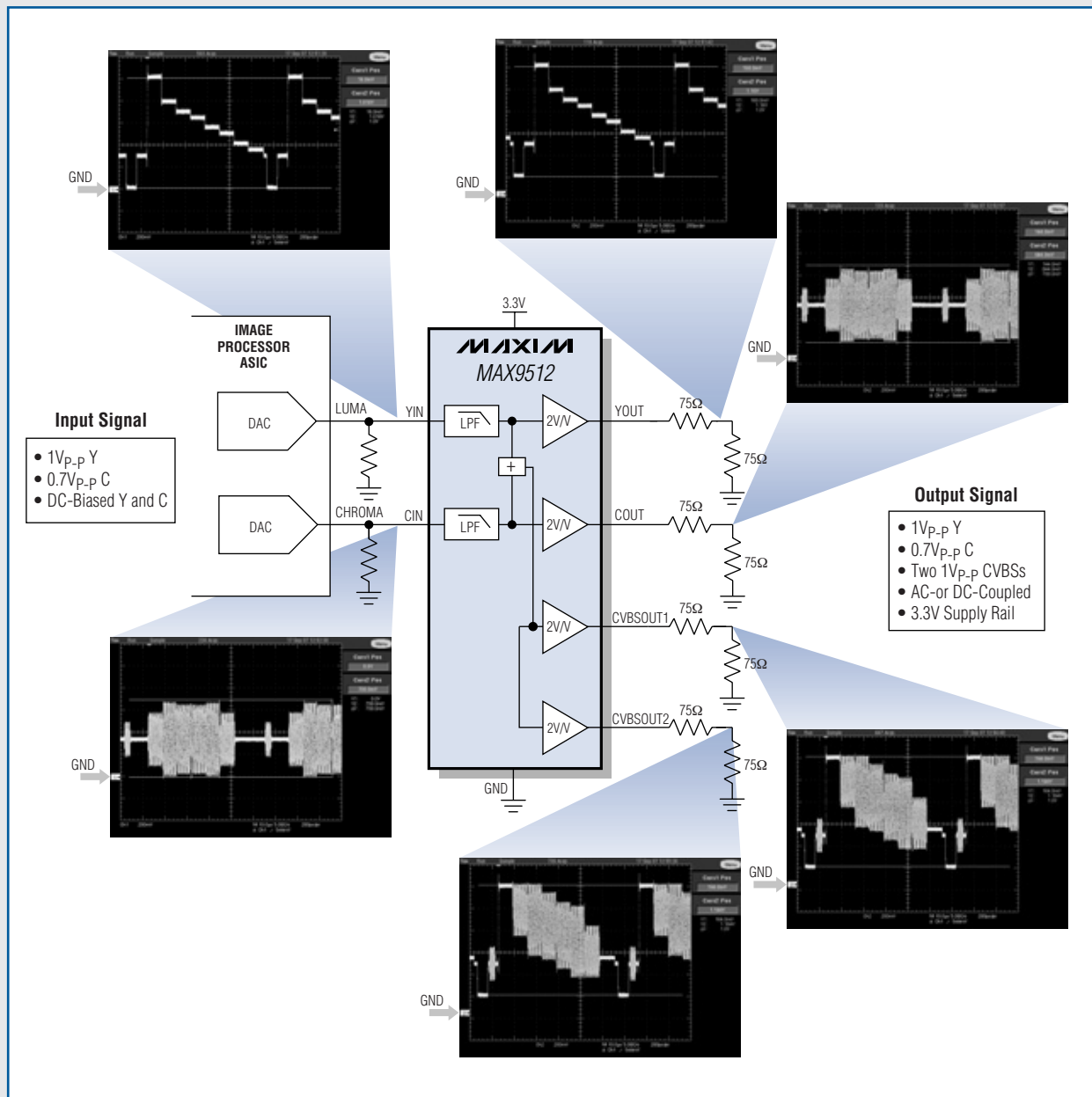


例4は興味深い構成となっています。通常、DACからはYとCの両方を出力しますが、例4の回路には出力ラインが1本しかありません。この出力は、CVBS信号かY信号の選択となっており、CVBS信号は加算(結合)回路を使って構築します。適切なタイミングで1本の出カラインを切り替え、2種類の信号を取り出すのは非常に困難です。このような場合、普通は、2:1のマルチプレクサを出カラインに取り付けます。幸い、この例で使用しているビデオフィルタアンプMAX9524には2つの単極アナログスイッチが内蔵されているため、これらを使って2:1のマルチプレクサとすることができます。こうすると、1つのチップで入力の選択からフィルタリング、増幅までを行うことができるため非常に便利です。なお、YとCが合算され、DCレベルは未知となるため、ビデオ信号はフィルタアンプの前でAC結合にする必要があります。AC結合コンデンサの後に入っているクランプ回路は、バイアスレベル設定用です。

CVBS信号を生成する結合回路の設計には注意が必要です。特にYとCのDCオフセットレベルおよびDACの電圧適合レベルは注意して検討すべきです。YとCを直接接続すると、各信号のDCバイアスレベルによっては、DACの電圧適合範囲を超えるCVBS信号が生成するおそれがあります。

## Y/C-CVBSミキサによる複数のビデオ出力

例5

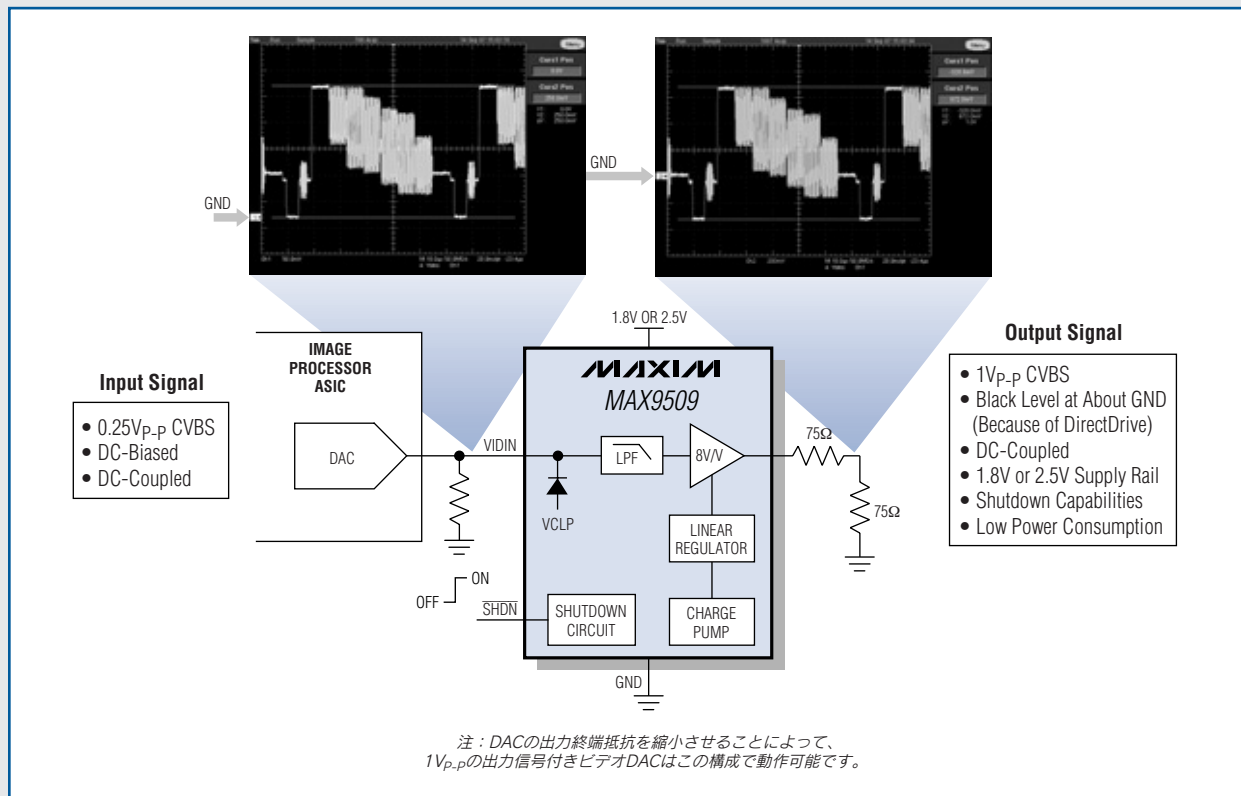


MAX9512には4つの独立した出力チャネルがあり、例5のように複数のビデオ出力を持つ回路を設計することができます。MAX9512は、YとCからコンポジットビデオ信号を生成するY/C-CVBSミキサも内蔵しています。各出力は、2つのDC結合のビデオ負荷、あるいは1つのAC結合の150Ω負荷を駆動することができます。また、この回路にはMaximのSmartSleep回路<sup>‡</sup>(図には表示なし)も内蔵されており、入力信号や出力負荷の有無を検出して、アンプのオン/オフを行い、消費電力を抑えることができます。この構成は、1つのSビデオ出力、あるいは2つのCVBS出力に対応したい場合によく利用されます。



## ほぼグラウンドのブラックレベルで低消費電力

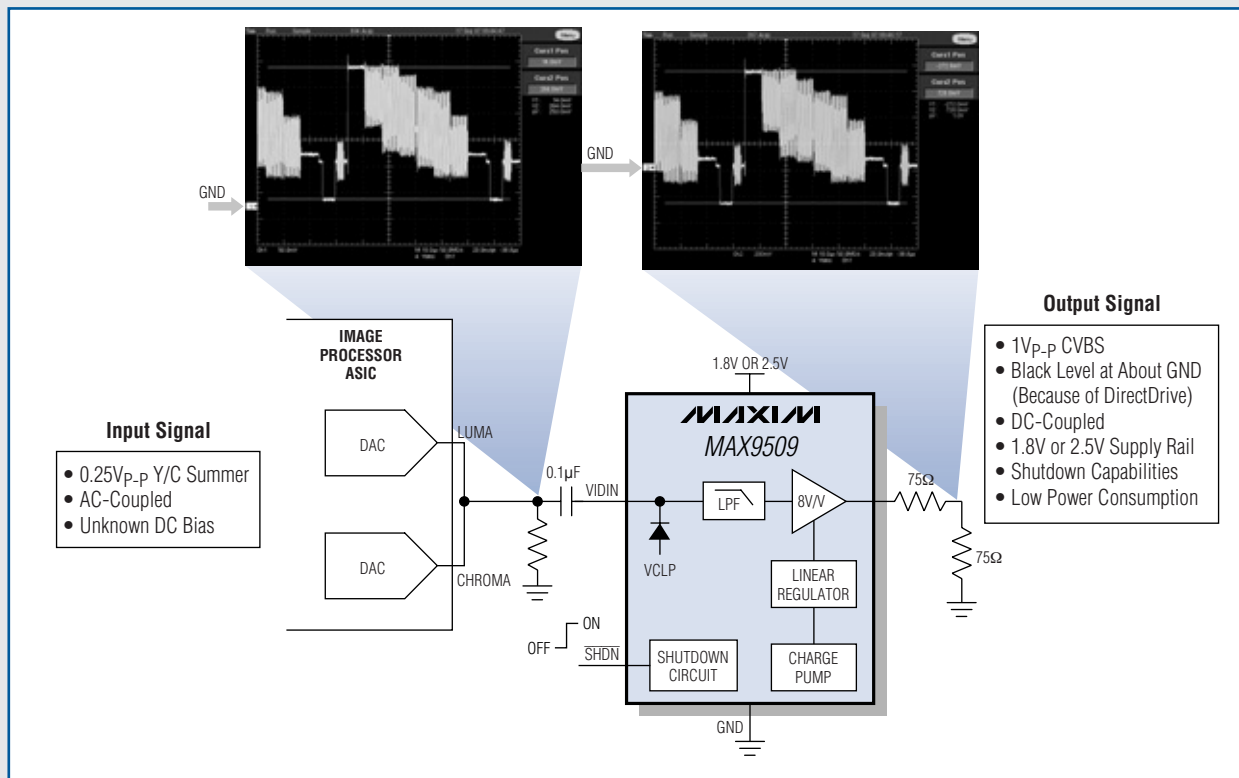
例6



例6は、1.8Vでも動作し、平均消費電力がわずか11.7mWのMAX9509を活用した低消費電力型回路です。また、この構成では、ブラックレベルがほぼグラウンドと等しく、出力に大容量の結合コンデンサが不要であること、また、ビデオ信号の内容にかかわらず、そのビデオ信号が-300mVから+700mVになるという利点があります。このアンプは8V/Vの内部固定利得であるため、DAC出力の振幅は0.25V<sub>p-p</sub>となります。なお、どのような種類のDACを用いても、その出力に接続する終端抵抗の値を変えるだけで、簡単にこれを実現することができます。

## 1つの出力からY、C、およびCVBS信号を出力

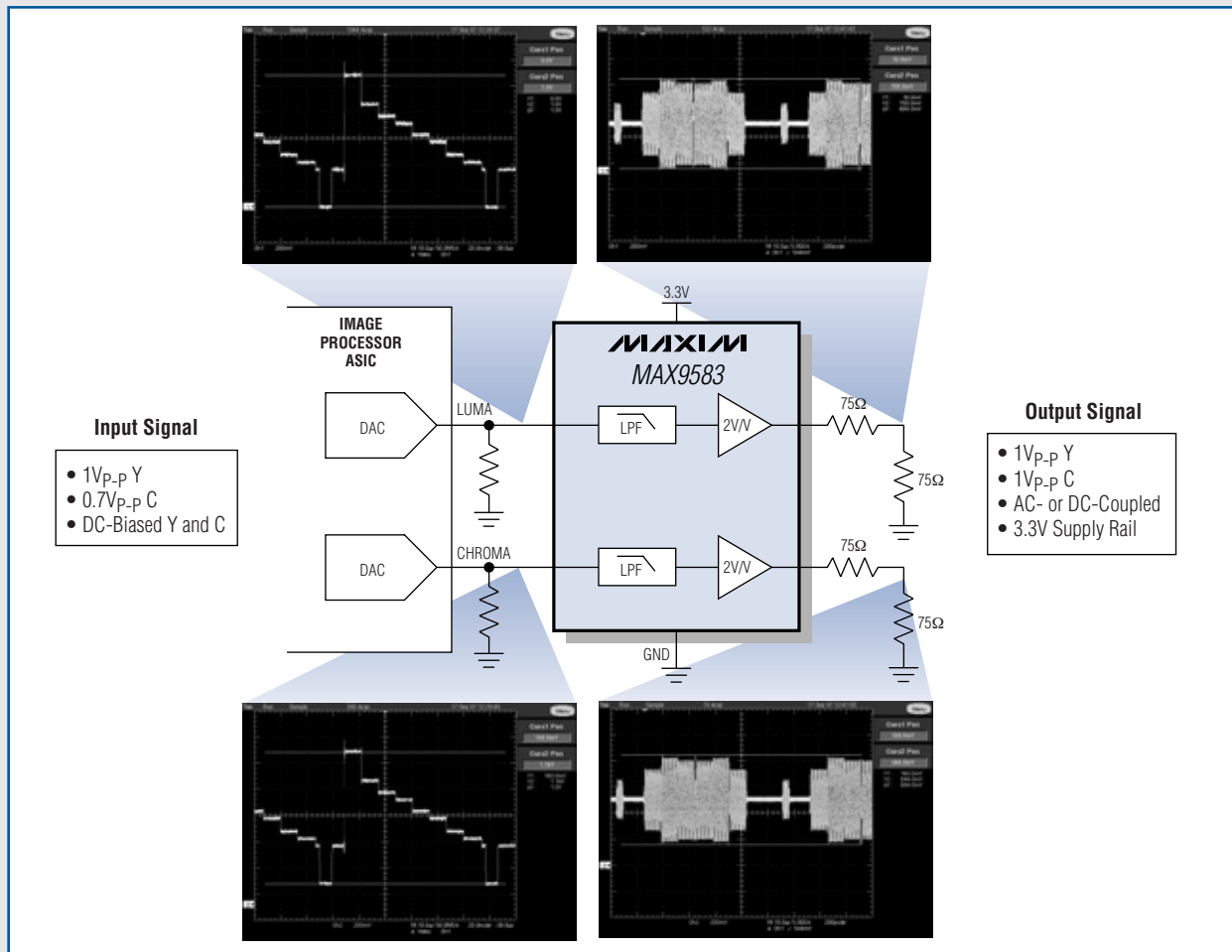
例7



アプリケーションによっては、DAC出力からY信号とC信号しか得られないのに、CVBS信号を出力しなければならない場合があります。そのような場合、結合回路によって必要な出力信号を得るのが一般的です。よく利用されるこのソリューションは例4で使われたものとよく似た結合回路となりますが、必要なCVBS信号が0.25V<sub>p-p</sub>となるため、ほとんどの場合、電圧適合範囲を満足するものと思われます。通常出力が1V<sub>p-p</sub>のDACであれば、DACの終端抵抗値を変えるだけで0.25V<sub>p-p</sub>という振幅を得ることができます。

例7は、超低電力アプリケーションに適したフィルタリングと増幅のソリューションです。DAC出力の終端抵抗をスケールダウンすることによって、適切な振幅(0.25V<sub>p-p</sub>)とすることができます。DCバイアスレベルは未知となる場合がある(信号と結合回路によって変化する)ため、MAX9509への接続はAC結合とします。信号は、入力端でシンクチップクランプのレベルによって適切にシフトされます。フィルタアンプにDirectDrive機能が内蔵されていることによって、アンプ出力のブラックレベルはほぼグランドになります。そのため、出力に大容量の結合コンデンサを挿入する必要がありません。このようにMAX9509は、150Ω負荷を2V<sub>p-p</sub>のビデオ信号で駆動することができます。

## DCオフセットなしで2つのビデオ信号を出力



2系統のビデオ出力信号(Sビデオなど)が必要な場合、例8に示すように、2チャンネルのビデオフィルタアンプ MAX9583を採用すると、コンパクトなソリューションが実現可能です。MAX9583は2V/Vの内部固定利得で、1V<sub>p-p</sub>出力のDACとの組み合わせに適しています。デバイスの出力はAC結合によって150Ω負荷へ接続するか、あるいはDC結合によって2系統のビデオ負荷に接続することができます。ビデオ信号をAC結合することによってDCオフセットを取りのぞくことができます。なお、ブラックレベルはビデオの内容によって変化します。

### まとめ

このアーティクルでは、最近のビデオカメラアプリケーションでよく利用されているさまざまな構成を紹介しました。そのようなアプリケーションでは、出力信号として一般にCVBSとY/Cが利用されます。ハイエンド機器では、YPbPrによって標準画質(SD)あるいは高画質(HD)のビデオを出力する場合があります。今回のアーティクルでは取りあげていませんが、このようなケースについても高集積ソリューションが存在することを覚えておいてください。

†米国特許番号7061327

‡特許出願中