

賛助会員のページ

粒子加速器に最適な水冷ソリッドステート RF アンプの開発^{†1}

Shane DILLON^{*1}・Wilbert GONZALES^{*1}・Brad NOBEL^{*1}・Janice REID^{*1}
Chris SCHACH^{*1}・山崎 康^{*2, †2}・長岡 征典^{*2, †2}・菅野 裕一^{*2, †2}

Development of Rugged, Water Cooled Solid-State RF Amplifiers for
Accelerator Applications^{†1}

Shane DILLON^{*1}, Wilbert GONZALES^{*1}, Brad NOBEL^{*1}, Janice REID^{*1},
Chris SCHACH^{*1}, Yasushi YAMAZAKI^{*2, †2}, Masanori NAGAOKA^{*2, †2} and Yuichi KANNO^{*2, †2}

Abstract

Recent advances in transistor technology are making solid-state RF amplifiers an increasingly viable alternative to tube systems in accelerator applications. This paper details the development and performance of a range of new high power amplifiers, based on current MOSFET technology, and designed specifically for this application. A generic modular architecture that can be used to construct high power CW amplifier systems operating from HF up to S-band, is detailed. Key design considerations in terms of modularity, redundancy, reliability and cost are discussed.

1. はじめに

TOMCO Technologies (以下 TOMCO 社) はオーストラリアのアデレードに本拠地を置き、ソリッドステートによる RF アンプシステム (以下 SSA) の設計・製造で 20 年以上実績のあるメーカーである。創業以来、気象レーダーシステムや NMR 等の磁気共鳴装置他で多数の納入実績がある。標準ラインナップとしては周波数レンジ 10 kHz ~ 1 GHz, パワーレベルについてはパルスアンプで 100 kW まで、カスタム品ではパルスで数 100 kW, CW で 150 kW 級まで対応可能である。

標準、カスタムモデルともに、従来のアンプシステムは全て空冷システムにて設計されていたが、粒子加速器での採用実績が増えるに従いより高出力のニーズに対応、それに伴い放熱性を高め、かつアンプサイズをコンパクトにするため水冷のシステムが必須となった。

高出力のニーズに対応して今回、TOMCO 社は加速器用途向けに最新世代の LDMOS トランジスタを使っ

た新しいアーキテクチャによる水冷方式の 500 MHz と 800 MHz の高出力 SSA を開発した。

2. システム全体の構成

近年、新世代の LDMOS RF トランジスタのリリースに伴い、信頼性や耐久性に優れた高出力の RF アンプを構築することが可能となりコスト面でも真空管を用いたアンプに引けを取らないポテンシャルが得られるようになった¹⁾。

TOMCO 社は、その実現のために水冷システムが最適であると考え、新たにシャーシ、パワーアンプモジュール (以下 PA モジュール)、保護システム、コンバイナの開発を行った。

今回開発したアンプシステムは 19"ラックの 5 RU を基本パワーブロックとする構成とした。

基本パワーブロックには、8つの PA モジュールやコンバイナが実装される。図 1 は基本パワーブロックのブロック図、図 2 は基本パワーブロックの内部レイアウトである。

*1 Tomco Technologies, SA 5069, Australia

*2 ゼネラル物産株式会社営業本部

†1 Copyright, TOMCO Technologies

†2 翻訳及び技術サポート: TOMCO Technologies 日本総代理店: ゼネラル物産株式会社 営業本部 菅野裕一, 技術部 山崎康, 長岡征典

TEL: 03 - 3383 - 1711 www.general-bussan.co.jp

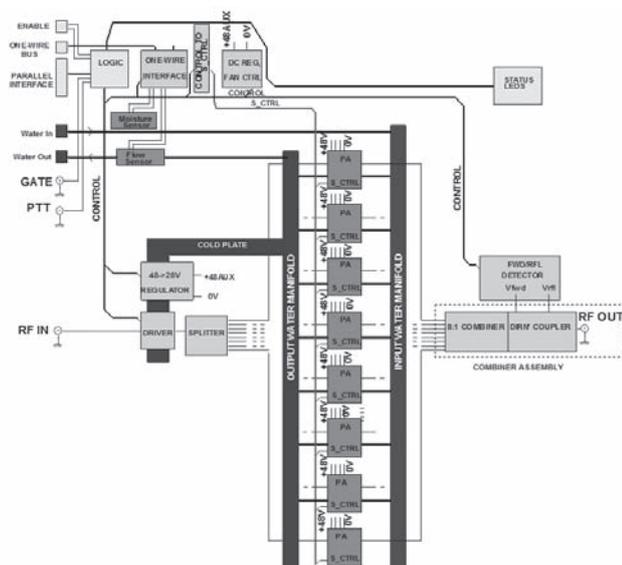


図1 基本パワーブロックのブロック図

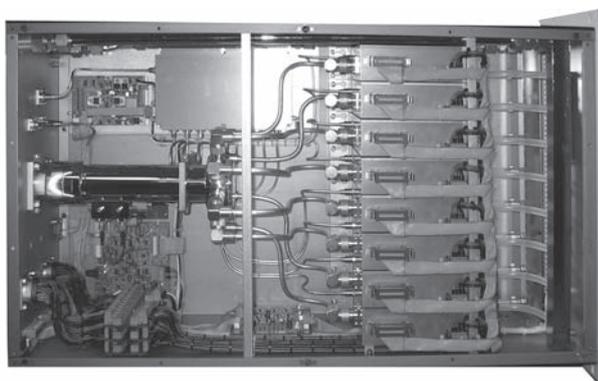


図2 19”パワーブロックシャーシ (3.2 kW CW, 800 MHz) の内部レイアウト, 7-of-8 冗長性

直流電源は別の19”シャーシに配置し, “hot-pluggable” タイプのモジュール電源であるため, 動作中の交換も可能とする構成とした。

また, 各 PA モジュールは動作周波数が異なっても同じ構成であるため, 基本パワーブロックにおいても動作周波数が異なった場合でも同じ構成となる。また基本パワーブロックの定格出力電力は周波数により異なるが 1.5 kW から 6.0 kW 迄対応が可能となっている。

本アーキテクチャにより, 同一の基本パワーブロックを積み重ねることで大規模システムを任意に構築することができるため, システム構成の柔軟性や拡張性を可能とし, 更に設計 / 製造コスト, リードタイムの削減も可能となった。

1つのシングルラックには, 最大で4個の基本パワーブロックを組み合わせることが可能であり, 更なる大規模システムには複数のラックを組み合わせることも可能となっている。

3. システム特長

3.1 基本パワーブロック構成

一般的な SSA は, 並列に接続した複数の同一 PA モジュール, ドライバ, 保護 / 制御回路, スプリッタ, コンバイナ, PSU から構成されている。

これら各モジュールの組み合わせ方法は, 冗長性, 信頼性, メンテナンス性, 基本ブロック当たりの出力レベルを考慮して決定しなければならない。

冗長性の高い高度な並列システムは非常に信頼性があるもののコスト高となり, システム全体も複雑となる。また高度な直列システムはよりシンプルで安価であるが, 冗長性が劣るため信頼性が低下する可能性がある。

TOMCO 社は以下の条件を満たすための最適なアーキテクチャとして, 基本パワーブロックごとに8個の PA で構成する事が最適な解決法であるとした。

- 信頼性 :
許容範囲内のコストで, 本来あるべき冗長性を設計に組み込むことが必要。
- 基本ブロック当たりの出力レベル :
許容範囲内のコストで, 十分大きくかつ適切な出力増加が出来ることが必要。
- サービス性 :
重量制限を約 40 kg と設定し, アンプシャーシは物理的に扱いやすいことが必要。

3.2 信頼性と冗長性

SSA は, 1つ以上の並列モジュールに不具合があった場合でも動作を続けることができるため, 一般的に冗長性が高いと言われている。しかし, そのような部分的な不具合がある状態でシステムが必要なレベルの出力を出せない場合, 本来あるべき冗長性を満足しているとは言えないと考えている。

冗長性は設計段階から考慮していく必要があり, 正しいレベルの冗長性を選択することは常にコスト面でも課題となる。

今回コストと可能性のある信頼性を比較した結果, “7-of-8 の冗長性” (8個の PA モジュールの内1個に不具合が生じて, 基本パワーブロックは最大出力を起こせる) を採用することが最適と判断した。

一般的に, 異なるレベルの冗長性の相対的なコストを比較するにはシンプルな静的信頼性解析を用いる。期間を t とした “k of n” 冗長性システムの信頼性は次のように与えられる。

$$R(t) = \sum_{j=k}^n C_k^n p(t)^j (1-p(t))^{n-j},$$

ただし、 R は並列システム信頼性、 p はモジュール静的信頼性、 C_k^a は二項確率分布である²⁾。

1つの800 MHz PA モジュールについて、5年以上の静的信頼性は0.95である（理論的MTBFを用いて計算し、指数型信頼度関数を想定）。これにより、8モジュール並列システム信頼性は冗長性なしで $R(t) = 0.675$ ，“7-of-8の冗長性”の状態では $R(t) = 0.94$ となる。これはMTBFのファクター7の改善に相当するので、7-of-8の冗長性が信頼性を顕著に改善することを示している。

8モジュールの内1つに不具合が生じた場合、コンバイナの電力損失を考慮に入れると残りの7つは約1 dB出力を増やせるようになっていることが必要である。このため通常は、アンプのDC rail (LDMOSへの印加電圧) は全電圧より約15%低く設定されており、モジュールに不具合が起きた場合、DC railが最大限までに切り替えられ全出力の状態を取り戻す。従って、通常の動作ではPAモジュールは低い電圧で動作するため、熱放散の大幅な減少やダイ温度の低下につながる、MTTFが延びることになる。

この方法の更なる利点は、システムを拡張しても冗長性レベルが保たれることである。

例えば8つのパワーブロックのあるシステムは、各パワーブロックで1個のPAモジュールが同時に故障して出力が出せなくなっても、システムは全出力を出し続ける事が出来る。

図3は7-of-8の冗長性のある800 MHz、3.2 kWアンプの標準状態と部分的に不具合が発生している状態の電力スイープの比較を示している。ゲイン/位相の直線性と出力は維持されており、トランジスタ動作点がシフトしたことによる特性の変化はわずかであること

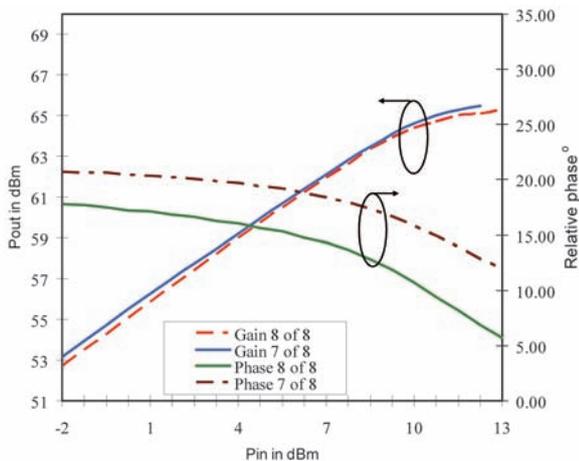


図3 標準状態と部分的な不具合を模擬した状態のゲインと位相スイープ (800 MHz, 3.2 kW)

が確認出来る。

注：図3は、アンプのゲイン特性の比較を容易にするため、7-of-8でゲインを1 dB意図的に増加させ重ね合わせた。

3.3 水冷システム

新型LDMOSトランジスタから得られる超高出力密度（単位体積当たりの出力電力）を活用するには、非常に効率の良い冷却システムが必要である。トランジスタのデータは、一般的にダイ温度が10°C上昇するにつれMTTFはファクターが約2減少する可能性があることを示している。

これら冷却システムの開発にあたり、TOMCO社では多くの異なる冷却プレートの設計が検討された。

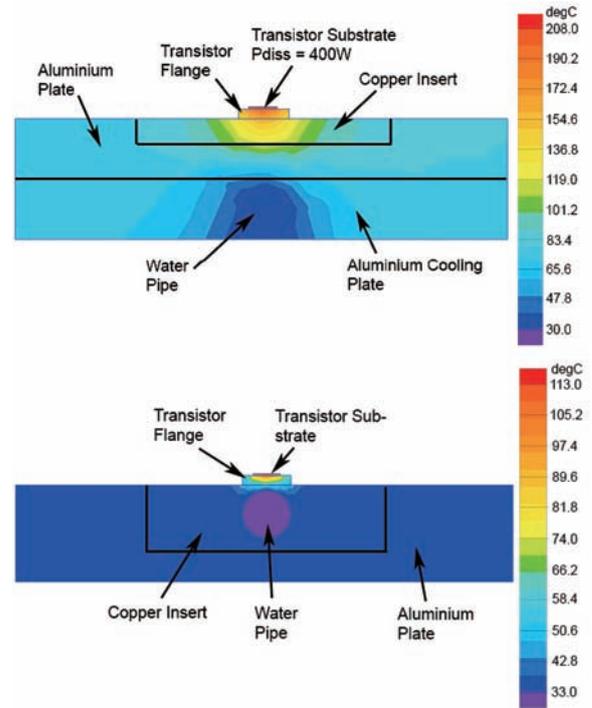


図4 2通りのトランジスタ冷却装置の有限要素モデル (800 MHz PA)

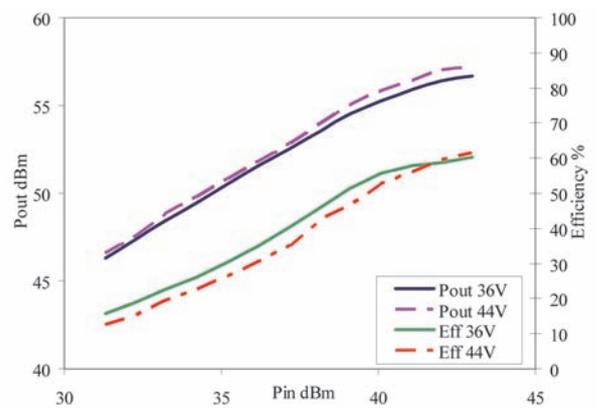


図5 2つの異なるDC電源電圧での800 MHz PAモジュール出力と効率性

図4は、2通りの異なる冷却システムの有限要素モデルの比較を示している。上段は、PAをアルミニウム・エンクロージャー（アルミの囲い）内に銅ヒートスプレッダを結合し、アルミニウム・エンクロージャーを市販の冷却板にボルトで留める構成とした。

下段は、熱抵抗を最小値に抑えるようトランジスタを直接銅製ウォータージャケットに結合する構成とした。

RF動作時のダイ温度を直接赤外線測定で計測し、下段の構成で400 Wの熱放散に対してダイ温度は水温プラス100°C以下に保たれていることが観測された。この状態でのLDMOSトランジスタのMTTFは一般的に1000年以上である。

冷却管内の流量により、冷却システムの全範囲に乱流が維持されていることを確認するために、さまざまな冷却管形状の流量に応じた熱抵抗の測定も行った。

3.4 効率性

LDMOSトランジスタは効率性に優れているが、トランジスタが飽和状態に近い状態で動作している時に最高の効率になる。トランジスタの飽和点はDC電源電圧にほぼ追従するので、異なる出力レベルにおいても効率性と直線性が良好に保たれるように、DC電源を遠隔調整できるようなシステムとした（図5）。

3.5 遠隔制御とモニタインターフェイス

ユーザーインターフェイスには、制御信号とモニタ信号がある。

これらは、パラレルインターフェイスを採用することで、制御信号とモニタ信号の全二重動作が可能となっており、更にシリアルインターフェイスにありがちな通信の複雑さやタイムラグを回避している。

その他、サブ通信システムとしてOne-Wireシリアルプロトコルを採用した。本インターフェイスでは、個々のモジュール温度、順方向電圧、反射電圧、DC消費電流のようなリアルタイムでの監視を必要としない比較的重要度が低い情報を提供する。

3.6 パルス運転

本アンプには、高速RFゲートとバイアススイッチ機能がある。パルス運転時には、パルス間のノイズ・ブランキングをもたらす。パルス出力は大変速い立ち上がり時間と立ち下り時間を示し、リングングやオーバーシュートが見られない（図6）。

3.7 保護機能

アンプシステムは極めて頑丈であり、無限出力不整合、帯域外入力信号または入力信号のオーバードライブ、結露、冷却水の不具合といった状態に対し損傷せずに耐えることが必要である。

不十分な冷却から保護するため、トランジスタと密

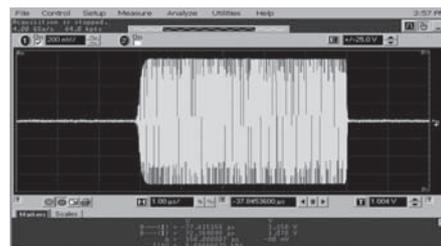


図6 パルス運転. 5 μ sパルス幅, 800 MHz, 3.2 kW PEP. 1 μ S/div.

接に結合した熱スイッチが設けられている。これは、流量センサーからの情報だけではトランジスタが安全な温度範囲内で確実に動作しているかの判断が出来ないため採用した。

無限負荷不整合に因る反射電力に対するアンプシステムの保護は、それぞれのPAモジュール内部にサーキュレータや終端抵抗器を使用することで対応している。サーキュレータやその終端抵抗器は、アーク放電時に見られるような高ピーク出力過渡反射に耐え得る定格のものが使用されている。また、このシステムは出力に接続した負荷を、ユーザが調整可能なALC（自動レベル制御）を介して進行波電力レベルと反射波電力レベルの両方について、ある程度保護することが出来る。

4. ソリッドステートアンプの優位性

真空管を使用した従来型のアンプの場合、駆動用電源で数10 kV～数100 kVの高電圧が必要となるが、SSAは50 V程度の低電圧電源を使用するため安全性で大きな優位性があると言える。

またメンテナンス性においても真空管は寿命が短く、その交換には高度な専門知識を持った技術者と真空管自体の追加コストが必要となる。SSAは高度な専門知識が無くても、モジュール交換により容易にメンテナンスが可能である。

5. 1.3 GHz以上の開発

TOMCO社では従来の10 kHz～1 GHz帯域の高出力RFアンプに加え、1.3 GHzと1.8 GHz帯域のモデルを現在開発中である。それらのシステムは前述のデザイン・テンプレートをベースとし、各周波数帯域用に開発されたPAモジュールやコンバイナ、ドライバが含まれる。5 RUのパワーブロックの出力目標値は1.3 GHzの場合3.2 kW、1.8 GHzで2 kWを目指している。製品のリリースとして1.3 GHzシステムは2011年末、1.8 GHz～S-bandシステムは2012年前半を予定しており、現在1.3 GHzのPAモジュールとドライバのプ

ロトタイプを評価試験中である。

6. 加速器用途での納入実績

粒子加速器の用途では、米国の SNS 施設に 400 MHz/25 KW, 2 MHz/120 KW, 800 MHz/2 KW 等多種の空冷 RF アンプシステムを納入しており、国内のシンクロトン施設に採用されたアンプシステムは、前述の水冷システムが使用されている。

7. ま と め

TOMCO 社では最新型 LDMOS トランジスタを最大限に活用すること、そして信頼性を大幅に高める 7-of-8 の冗長性を取り入れることで、加速器向けに信頼性の高い大変コンパクトなハイパワーアンプのリリースが可能となりました。真空管アンプを使用した既存加速器のビーム性能向上や将来的な ILC での適用を見据え、現在 1.3 GHz ~ 1.8 GHz モデルの開発に力

を入れております。

輸入販売元のゼネラル物産では、今後も円高傾向のメリットを生かし、既存の真空管タイプの高出力アンプからの置き換えのご要望に積極的に対応して参ります。

国内でも加速器向けフルカスタム RF アンプの実績が出来、専任のエンジニアもおりますので、技術的なご質問、ご要望等ございましたら弊社（脚注及び本誌巻末の広告ご参照）までお気軽にお問い合わせ下さい。

参考文献

- 1) Marco Di Giacomo, "Solid State RF Amplifiers for Accelerator Applications", PAC'09, Vancouver, 5th May 2009, TU4RAI01.
- 2) B. S. Dhillon, "Reliability, Quality, and Safety for Engineers" Chapter 4, CRC Press 2005, ISBN: 978-0-8493-3068-1.