

デジタル低電力高周波 (LLRF) 制御装置 Libera LLRF

林 克也*

All-in-one Digital LLRF Control System “Libera LLRF”

Katsuya HAYASHI

1. Libera シリーズについて

Libera は、中欧スロベニアに本社を置く加速器用電子機器専門メーカー Instrumentation Technologies 社が開発した加速器用デジタル計測・制御装置のシリーズです。

その主力機種である「Libera Brilliance」は放射光施設のストレージ・リングをターゲットに開発された

デジタル BPM で、従来のアナログ方式の BPM に比べて一桁上の精度でのビーム位置測定を可能にする製品です。最新鋭の放射光施設 Synchrotron Soleil や DIAMOND Light Source で夫々 100 台以上が Global Fast Orbit Feedback System の BPM として採用されているのを始めとして、合計 1500 台以上が世界中で稼動しています。

Libera シリーズではこの他に、結合バンチ不安定

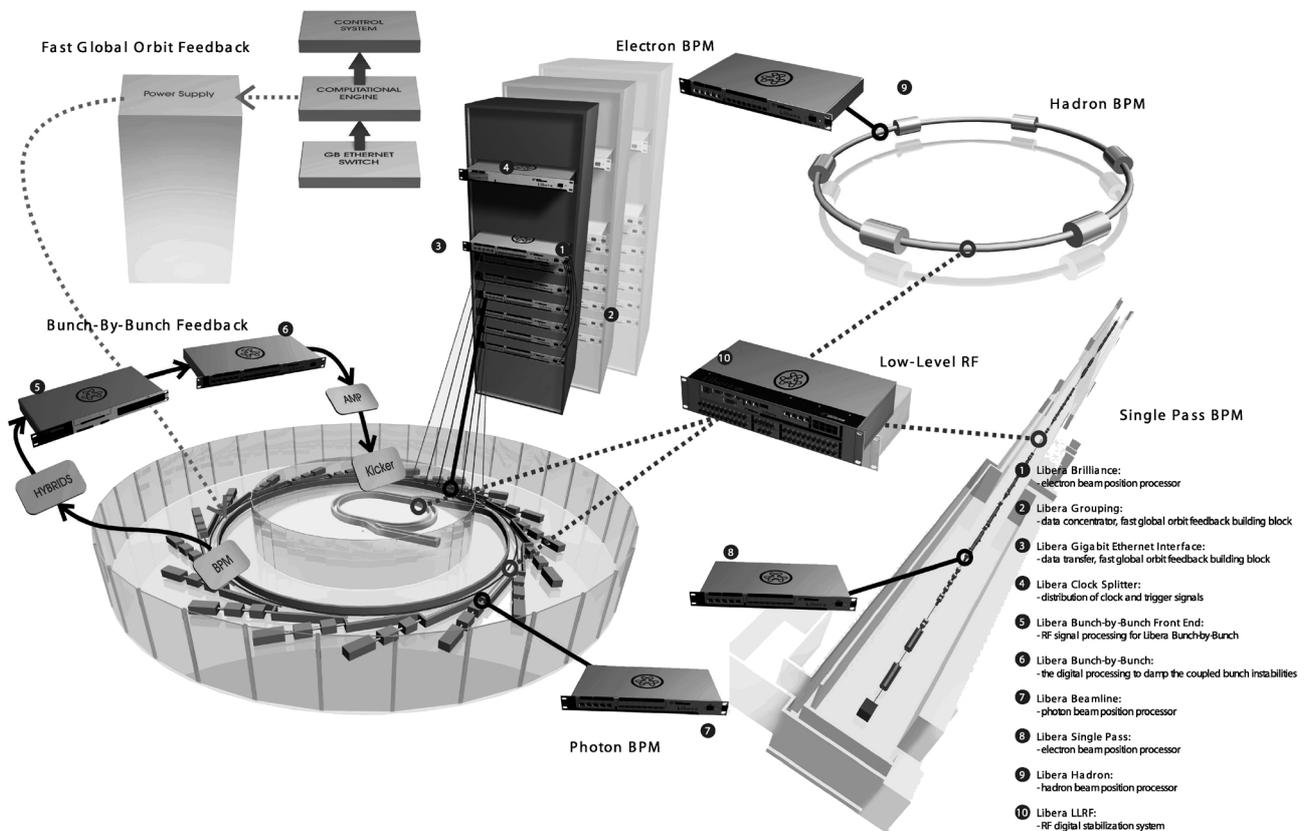


図1 Libera シリーズ・ラインナップ

* エムティティ株式会社 技術本部 PMK 室
(E-mail: k-hayasi@mtt.co.jp)

性除去専用機「Libera Bunch-by-Bunch」、ハドロン・リング専用BPM「Libera Hadron」等がリリースされており、ビームライン専用の「Libera Beamline」やLinac専用の「Libera Single Pass」等が開発中です。

今回ご紹介する「Libera LLRF」は、新たに投入されたシリーズの最新機種で、LLRF制御専用機です。

2. デジタルLLRF制御

デジタル方式のLLRF制御は、フィードバック及びフィードフォワード・ループを介して空洞電圧を安定化させ、加速器の全般的な性能向上をもたらします¹⁾。FELのような最新設備では、設計仕様に到達するためにRFパラメータの厳密な制御が求められます。例えば理化学研究所のSCSSにおいては、一部の設備で最大 $0.06^\circ @ 1.428 \text{ GHz}$ の位相安定度と $\pm 0.01\%$ の振幅安定度が求められています²⁾。デジタルLLRFは、アナログ・システムでは得られない柔軟性、ソフトウェアによる再設定、組込み診断機能、遠隔制御、複雑なアルゴリズムの実装、マルチユーザ機能のサポートといった数々の利点を備えています。中でも、最も重要なのが再現性の制御とドリフトの欠如です。また、組込み診断機能はシステムの完全な最適化を可能とするものであり、施設の最適運転のために重要なものです。RF設備には常時稼働が期待されており、施設の停止時間に対するその寄与度を考慮すれば、これは特に重要になります。更に、多空洞システムにおいてはベクトル和較正が容易になり、先進のソフトウェア・アルゴリズムと制御の実装により恩恵をこうむります。LLRFは、RF設備に安定したドライブ信号を提供することに加えて、システムのインターロックとトリガを提供し、空洞のチューニングを行い、ピエゾ・モータやフェーズ・シフタを制御する能力を備えている必要があります。

過去十数年間で、ネットワーク接続機器、DSPやFPGAの活用といったデジタルLLRFを実現するための技術が開発されました。DSPとFPGAは、高速の信号処理とロジック・インターフェースに不可欠です。デジタルLLRFシステムは柔軟な設定が可能で、異なった装置の要求に対してカスタマイズが可能です。DSPがコードの実装を容易にする一方、FPGAは待ち時間の少ないシステムに必要です。システム設定の柔軟性により、複数のデータ・バス、ADC、DACの同一FPGA（十分に強力であれば）への接続が可能となります。このシステムは、ネットワーク接続、膨大なデータ・ストリームのロギング、

リアルタイム演算、高速かつ安定したタイミングと同期といった機能を実現できるプリント基板アーキテクチャを可能にします。待ち時間の少ないリンクを備えた先進のバックプレーン相互接続の使用により、複雑でありながらロバストで操作上は透過的なアーキテクチャが可能となります。

LLRFシステムの目的はRF増幅器（クライストロンやIOT）に安定したドライブ信号を供給することにあります。システムの基本構成はアナログのフロントエンドとバックエンド、デジタル処理部及びタイミング・システムです。デジタルLLRFの典型的な操作にはリファレンス及びサンプリングされたRFフィールドのデジタル処理部へ、すなわちADCからFPGAへのI及びQ成分としての転送が含まれます。RF入力信号はADCに渡される前にADCのサンプリング周波数に従って中間周波数にダウン・コンバージョンされます。サンプルの処理と所望のフィードバック論理ループは、FPGAが行います。デジタル・タイミング・システムがFPGA、ADC、DACに対してクロック・トリガを供給します。FPGAの出力はDACで処理され、アップ・コンバートされて最終の安定したドライブ周波数に変換されます。

3. Libera LLRF

Instrumentation Technologies社が開発したデジタルLLRFシステム「Libera LLRF」は、以上で述べたブロックを全て内蔵し、運転RFが350 MHzを下回るものから12 GHzにまで及ぶ幅広いクラスの加速器システムの要求を満たす柔軟性の高いプラットフォームとなっています。

「Libera LLRF」のアーキテクチャは、AMC規格上に実装されたPCI Expressに基づいています。本機は使いやすいネットワーク接続機器で、複数のサテライト・ボードを管理する計算機相互接続ボード (Computational Interconnect Board: ICB) を内蔵しています。「Libera LLRF」は、各々9 chのRF入力を処理できるサテライト・ボードを4枚持つよう設定されています。各サテライト・ボードの1 chは、RFリファレンスの入力用です。加えて、アナログ・チェーン較正用の入力とオプションのローカル・オシレータ信号用入力も備えています。最終システムには、9 ch ADCボードとLVDSで接続されるベクトル・モジュレータ・ボードが内蔵されます。ベクトル・モジュレータ・ユニットは、グローバル・ベクトル和演算を行い、ヒストリ・バッファからのデータを管理します。

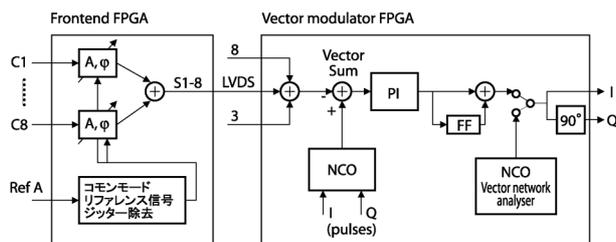


図2 FPGAブロック図

RFフロントエンドが最大8chまでの信号をデジタル化し、ダウンコンバートしてFPGAフロントエンドに引き渡す。ベクトル・モジュレータFPGAは、合計4台までのフロントエンド・ユニットからの信号をデジタル処理し、I・Q信号を出力する。この出力にバックエンドRFユニットがアップコンバージョンを行い、ドライブ信号として出力する

「Libera LLRF」は、RFシステムの識別のための豊富なRF診断アルゴリズムを備えています。このシステムはベクトル・ネットワーク・アナライザのように動作し、自動的に空洞の伝達関数を測定し、続いてRFシステムが空洞をチューニングします。一旦RFシステムの特徴が完全に明らかになり、全ての空洞が適正に動作し始めると、「Libera LLRF」はループの安定性を確保するために最適な制御パラメータ・セットを自動的に演算し、安定性の限界に関する全ての情報をオペレータに提供します。続いてループは閉じられ、「Libera LLRF」はクエンチ（超電導システムの場合）やその他の異常運転を防止するために空洞電場劣化解析を行いながら空洞のモニターを継続します。



図3 Libera LLRF 外観

「Libera LLRF」はトランスミッタのインターロックにトリガをかけるようプログラム可能な内蔵インターロックを備えています。これは、パルス式と連続波RFシステムの双方において、極めて正確な電場安定に適しています。高RFフィールドにおける長時間の振幅と位相の安定は、洗練された較正システムとアナログ回路の温度安定性により達成されます。追加ジッターの少ないLocal Oscillator (LO) 生成回路が、ジッター除去システムと相まって高度な位相の安定を可能としています。

参考文献

- 1) A. Brandt, "LLRF Systems for Modern Linacs: Design and Performance", Proceedings of LINAC 2006, Knoxville, Tennessee, USA, (2006), pp 498.
- 2) Y. Otake *et al.*, "Timing and LLRF System of Japanese XFEL to Realize Femto-Second Stability", Proceeding of ICALEPCS07, Knoxville, Tennessee, USA, (2007), pp 706.