

氏 名 Sigit Basuki Wibowo

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 1951 号

学位授与の日付 平成29年9月28日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Digital Low-Level RF Control System Development for  
International Linear Collider

論文審査委員 主 査 准教授 小林 鉄也  
准教授 松本 利広  
教授 道園 真一郎  
准教授 三浦 孝子  
准教授 方 志高  
主幹研究員 大島 隆  
高輝度光科学研究センター

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

The International Linear Collider (ILC) is an electron and positron collider facility for precisely investigating the Higgs boson, dark matter, and possible extra dimensions. In order to conduct such a precise experiment, high quality beams are required. Beams are accelerated in the cavities by radio frequency (RF) field. One of the important parameters that affect beam quality is RF stabilities. To achieve RF stability requirements, a field programmable gate array (FPGA)-based digital low level RF (LLRF) control system is used to regulate the amplitude and phase of the accelerating field with vector sum feedback (FB). The vector sum is the sum of complex vector representing the accelerating fields in all cavities. The RF stability requirements for ILC are 0.07 %(RMS) and 0.35 deg(RMS) for amplitude and phase, respectively. The ILC is organized in approximately 400 RF stations. Each RF station contains 39 cavities and driven by one 10 MW multi-beam klystron.

The objective of this study is to develop digital low-level radio frequency (LLRF) for the ILC. In the development process, the minimum setup of digital LLRF control system for ILC was demonstrated at superconducting RF test facility (STF) at KEK. The size of the ILC is huge which may arise many issues for its subsystems including digital LLRF control system. One RF station spans approximately 60 m. One issue related to this situation is that the long cable from cavity to the control system may introduce additional delay to the control loop which can lead to the instability. In digital LLRF control system, signals from cavities are down-converted to intermediate frequency (IF) signal before being digitized by analog to digital converter (ADC). Each IF signal requires one ADC. In order to get stable operation, many parameters have to be monitored. It implies the large number of signals from cavities must be measured. This creates the problem of mounting large number of ADCs in one board of digital LLRF control system.

Digital LLRF control system with master-slave configuration is proposed to eliminate the problems. In one RF station, the digital LLRF control system consists of master and slave controller. The slave controller is placed near the cavities to shorten the signal transmission from cavity to controller. Using this configuration, the large number of signals from cavities can also be distributed to several slave controllers. The slave controllers calculate the vector sum of their corresponding cavities, and send the result through optical communication link to the master controller in which the total vector sum calculation and control algorithm are performed. The minimum system of LLRF control system consisted of one master and one slave controller to regulate eight cavities with vector sum feedback controller,

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

was constructed at STF-KEK. The stability of 0.006 %(RMS) and 0.027 deg (RMS) in amplitude and phase, respectively, can be achieved. These stabilities can fulfill the ILC requirements.

Another way to mitigate the large number of ADC required in ILC is to implement IF-mixture technique in which several intermediate frequencies (IFs) are combined and fed in one analog digital converter (ADC). In this experiment, the four IFs were used. It leads to the reducing of the required number of ADC by fraction of fourth. Since the system uses more than one IF, the selection of IF should be considered to avoid interference among IFs. Those IFs were combined by a passive combiner. In practical situation, a combiner has certain level of nonlinearity which may introduce intermodulation. Intermodulation is generated by nonlinear device if two signals with different frequency are fed to it. The intermodulation can interfere other signals. Therefore, during the development, IF selection was performed by considering the intermodulation product generated by combiner. The digital LLRF control system with IF-mixture technique to regulate eight cavities with vector sum feedback controller was demonstrated at STF-KEK. The stability of 0.006 %(RMS) and 0.046 deg(RMS) in amplitude and phase, respectively, can be achieved and fulfill the ILC requirements.

The additional error to signal estimation may also be introduced by the down-converter characteristic such as non-linearity and temperature dependency. The direct sampling technique for signal monitoring is proposed to eliminate the down-converter. Because of the absence of down-converter in the control system, the non-linearity and temperature dependency of down-converter can be avoided. The signal monitoring with direct sampling method was demonstrated at STF-KEK.

博士論文審査結果の要旨  
Summary of the results of the doctoral thesis screening

Sigit 氏の博士研究は国際リニアコライダー (ILC) 実現のための RF 制御に関する開発研究である。ILC は従来とは異なるスケールの線形加速器で、衝突におけるビームの高品質、高安定性 (再現性) のため、加速電界には非常に高い安定性が要求される。従って RF 制御の性能は ILC 実現の重要な要素の一つになる。ILC では約 16000 台もの超伝導空洞が長距離に渡って並べられ、これらすべての加速電界を厳しい精度で安定化するとともに、高効率化、低コスト化を図ることが重要なポイントである。

近年、加速器の RF 制御では FPGA を用いたデジタル制御により、高速かつフレキシブルなリアルタイム制御が応用可能となり、より高度な制御方式が期待できる。その中でも Sigit 氏は、「IF-Mixture」および「ダイレクトサンプリング」という 2 種類の異なる手法に着目し、新しい制御技術の実用化に見通しをつけた。これらの手法によりデバイス/コンポーネントが大幅に省略/コンパクト化され、高い安定性と低コストの両立が期待でき、ILC での実現に向け大きく貢献した。

RF 信号 (1.3GHz) は通常、より低い周波数 (中間周波数: IF) に変換しデジタル化される。IF-Mixture は各 RF 信号をそれぞれ異なる周波数の IF 信号に変換し、その合成信号を 1 つのチャンネルで AD 変換する方式である。AD 変換されたデータから演算処理により各 RF 信号成分が分離・抽出される。この技術を用いると、膨大な数の信号を処理する ILC では、ADC の数を劇的に削減可能となり、コスト削減に寄与する。IF-Mixture では複数の中間周波数をどのように選択し組み合わせるかが重要となる。Sigit 氏は混合信号による干渉を十分に抑えるため、バンドパスフィルターなど高周波デバイスの特性や非線形素子のひずみ成分を詳細に検証した上で、周波数の組み合わせを選定する手法を独自に確立した。また、デジタル演算処理回路 (各信号成分の抽出の FPGA 回路) およびフィードバック (FB) 制御のデジタルシステムを自ら設計・構築した。STF では 8 台の空洞に対し 4 台ずつ ADC2 個を対応させ、IF-Mixture によるベクターサムの FB 制御に成功した。IF-Mixture を用いて 8 空洞同時の FB 制御は世界初である。その結果は ILC で要求される位相と振幅の安定度を満たしている。

一方、「ダイレクトサンプリング」は入力 RF 信号を IF 信号に変換せず、文字通り RF 信号を直接 AD 変換する方法で、この場合、周波数変換器 (Mixer) や LO 信号発生器などのアナログデバイス (それによる非線形性や不安定性) を無くすことができるため、高い安定性が期待できるとともに大幅なコストダウンが望める。しかし、RF の高速サンプリングにおいて高分解能を実現することが難しいこと、クロック信号のジッターの影響を受けやすいことから、高精度での実用利用は難しいと考えられていた。それに対し、Sigit 氏はサンプリングデータの平均化を効率的かつ高速に行う処理回路 (移動平均アルゴリズム) を独自に設計・構築し改良を行ない、その特性を詳細に検証した。その結果、ILC の要求を満たす分解能を得ることに成功し、実用利用の見通しをつけた。更に、世界初の例となる IF-Mixture の手法をダイレクトサンプリングに応用する試験を行なった。Sigit 氏は、異なる周波数の信号 (空洞 pick-up 信号と LO 信号) を 1 つの ADC でダイレクトサンプリングし、それぞれ十分な精度で分離・モニタできることを確認した。

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

その他、長距離に数多く並ぶ空洞制御においては、光リンクを使った master/slave 制御方式が重要な技術となる。ILC では 1 台のクライストロンで 39 台もの超伝導空洞に RF 電力を供給するデザインになっている。そのため信号処理をする FPGA(slave unit)を複数に分け、それぞれ別々の場所(対応する空洞付近)に設置するのが現実的なシステムとなる。各 slave unit で処理する信号データを光伝送で master unit に転送し、リアルタイムでデータを統合およびベクターサム FB 制御(クライストロン入力の制御)を行う必要がある。Sigit 氏は STF で master/slave 制御方式による FPGA システムを構築し、この制御方式の有効性を実証した。その際、master/slave 間のタイミング調整(それぞれの slave unit 間のデータを同期する方法)など重要な手順を確立し、STF の 8 台の空洞でベクターサム制御に成功している。その結果、ILC の要求性能を十分に満たすことが確認できた。また、以上の成果を踏まえ、master/slave 構成と IF-mixture 技術を併せた新しいデジタル LLRF 制御系のモデルを ILC に向けて独自に提案している。

以上のように Sigit 氏は ILC の実現の鍵となる様々な RF 制御技術を実験的に検証し確立させ、実用化に向け具体的な見通しを示した。その成果は関連する複数の国際会議で口頭発表により報告されている。また、IF-Mixture に関する論文を学術誌(PRAB)に投稿しアクセプトされ、掲載される予定となっている。さらにもう 1 件、ILC におけるデジタル低電力高周波制御に関する論文を投稿する予定で準備を進めている。以上により、本審査委員会では全員一致で Sigit 氏の博士論文を合格と認定した。