

Development of the digital feedback system for a next-generation small-size high-brightness photon beam source

Hitoshi Yoshitama^{*A)}, Tomoya Akagi^{A)}, Masao Kuriki^{A)}, Tohru Takahashi^{A)}, Ryuta Tanaka^{A)}, Sakae Araki^{B)}, Junji Urakawa^{B)}, Tsunehiko Omori^{B)}, Toshiyuki Okugi^{B)}, Hiroataka Shimizu^{B)}, Nobuhiro Terunuma^{B)}, Yoshisato Funahashi^{B)}, Yosuke Honda^{B)}, Kazuyuki Sakaue^{C)}, Masakazu Washio^{C)}

^{A)}Graduate School of Advanced Science of Matter, Hiroshima University

1-3-1 Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima, 739-8530

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)}Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

3-1-4 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555

Abstract

We are developing a digital feedback system for next-generation small-size high-brightness photon beam source using by laser-inverse Compton scattering. We demonstrated feedback test with digital system for keeping a resonance. Furthermore, we demonstrated automatic peak detection and cavity locking. In this article, we report the development status of our digital system.

次世代小型高輝度光子ビーム源の為のデジタルフィードバックシステムの開発

1. はじめに

線形加速器によって加速された電子ビームとレーザー蓄積共振器内で増幅された高強度レーザーパルスとの逆 Compton 散乱を利用した次世代小型高輝度光子ビーム源の開発を行っている。この反応を利用すると、電子ビームのエネルギーは小さくて済むため、従来の放射光施設に比べて装置が小型化できるという利点がある。

逆 Compton 散乱による光子ビーム生成反応を安定して行うためには、共振器が共鳴条件 ($L = n\lambda$, $n \in \mathbb{N}$) を保ち続ける為のフィードバック制御及び電子ビームとレーザーパルスの衝突タイミングを調整するための電子加速器、パルスレーザーを共振するレーザー共振器そしてレーザー蓄積共振器のそれぞれが同期のとれたフィードバック制御を行う必要がある。ここで L 及び λ はそれぞれ共振器長とレーザー波長である。そこで、これらの制御を行う為のデジタルフィードバック制御システムの開発を行っている。

デジタルシステムはアナログシステムと比較して以下の長所がある

- 全ての操作を自動化できる。
- コードを書き換えるだけで仕様の変更が可能のため、システムに柔軟性、冗長性を持たせられる。
- 他のデジタル機器と連動して動かすことができる。

本研究ではこれらの利点を生かしたフィードバック制御を行うべくデジタルシステムの開発を進めており、レーザーの共鳴点の自動検出、共鳴点での自動ロック、制御パラメーターの自動最適化、ネットワークに接続してのリモート操作などの機能が搭載される。ここではその開発状況について報告する。

* yoshitama@huhep.org

2. デジタルフィードバックシステム

PI 回路を FPGA に書き込むことでデジタル PI 回路を作成し、共振器が共鳴を維持するためのフィードバックテストを行った。ここで使用した PI 回路の方程式は

$$u_k = u_{k-2} + b_0 e_k + b_1 e_{k-1} + b_2 e_{k-2} \quad (1)$$

である。ここで

$$b_0 = K_P + \frac{T_s}{2\tau_I} \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{T_s}{\tau_I} \quad (3)$$

$$b_2 = -K_P + \frac{T_s}{2\tau_I} \quad (4)$$

である。ここで K_P 、 τ_I 、 T_s はそれぞれ比例回路のゲイン、積分回路の時定数及びサンプリング周期である。式 (1) をブロック図で表すと図 1 の様になる。

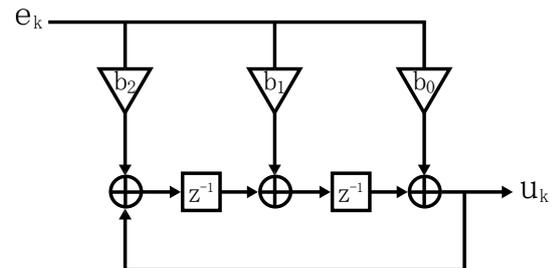


図 1: デジタル PI 回路のブロック図

誤差信号の取得には Honda 法を使用した^[1]。これは三次元光共振器に固有の性質を利用した方法で、共振器

からの反射光の p 偏光強度と s 偏光強度の差をとることで、共振点付近で符号が反転する誤差信号を作り出す方法である。

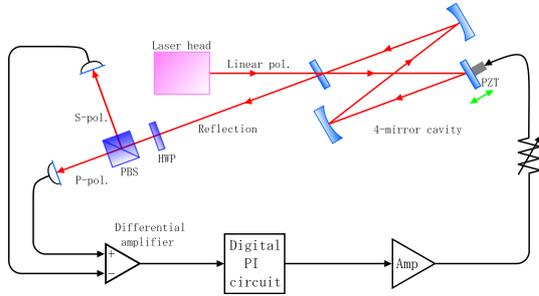


図 2: 共振器長変調方式のセットアップ

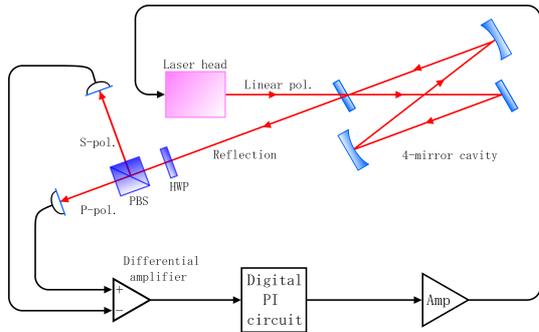


図 3: 周波数変調方式のセットアップ

フィードバックテストは誤差信号を共振器に戻して共振器長を変調する方式と、レーザーヘッドに戻してレーザー周波数を変調する方式の二つについて行った。図 2 に共振器長変調方式、図 3 に周波数変調方式のセットアップを示す。使用したレーザーは波長 $\lambda = 1064\text{nm}$ の CW レーザーで、共振器に入射されるレーザーパワーは 85mW である。

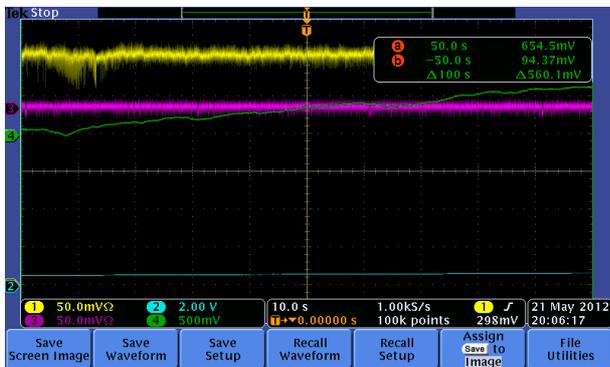


図 4: 周波数変調方式による共振状態の維持。黄線が透過光、青線がレーザーヘッドへの印加電圧、紫線が誤差信号、緑線が PI 回路の出力を示す。

図 4 にフィネス $F = 1470$ のときのフィードバックによる共振維持の結果を示す。この図から 100s 以上共振状態が維持されていることが判る。

3. 自動操作システム

前述したようにデジタルシステムの特徴の一つに自動操作がある。ここでは共振のピークを自動で検出し、共振器長を固定することで共振状態を維持する”オートロックシステム”を開発した。図 5 にオートロック機構を示す。

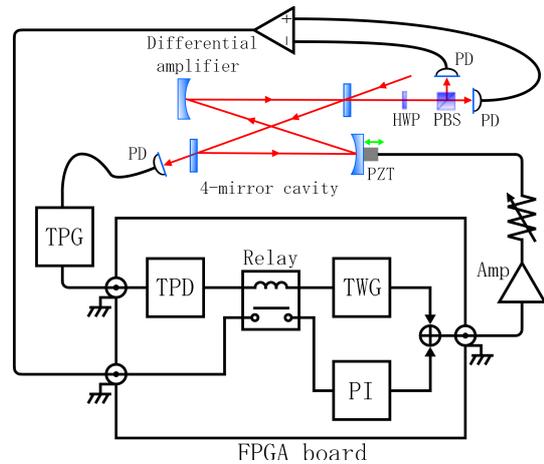


図 5: オートロック機構。図中のブロック内に書かれている略号 TPG、TPD、TWG はそれぞれトリガーパルス発振器 (Trigger Pulse Generator)、トリガーパルス検出器 (Trigger Pulse Detector)、三角波発振器 (Triangle Wave Generator) を意味する。

オートロックは以下の手順で行われる。

1. 三角波発振器よりピエゾ掃引を行うための三角波が出力される。
2. 共振器長が共振条件に近づくとき透過光強度が大きくなる。
3. 透過光強度が予め決めておいた閾値を超えるとトリガーパルスが出力され、それが検出されると”ロックシグナル”が出力される。
4. 三角波発振器にロックシグナルが入力されるとその時点で三角波の電圧がラッチされる。
5. 三角波の電圧がラッチされると同時に PI 回路に誤差信号が入力され始め、共振器長の制御が行われる。

図 6 にオートロックのテスト結果を示す。ここではトリガーパルスが出力される閾値を共振ピークにおける透過光強度の 82% とした。この図が示すように、初めは単調に増加していた三角波の電圧がロックシグナルが出力されると同時にラッチされ、それと同時に PI 制御に切り替わることによって共振状態が維持されていることが判る。

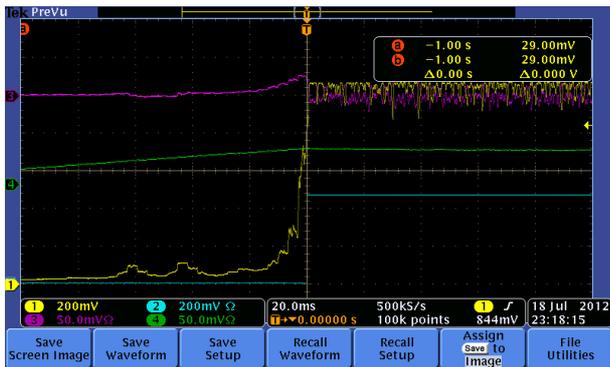


図 6: 自動操作によるオートロック。黄線が透過光、青線がロックシグナル、紫線が誤差信号、緑線がデジタル回路 (PI+三角波) の出力を示す。

4. まとめと今後の予定

小型高輝度光子ビーム源の為のデジタルフィードバックシステムを開発し、フィネス $F = 1470$ の共振器で共鳴状態が 100s 以上維持された。オートロックシステムを開発し、共鳴ピークの検出及び共振器長固定の自動操作に成功した。今回開発されたデジタル制御システムは今秋に高エネルギー加速器研究機構の ATF 加速器施設にインストールして試験運転を行い、その後制御パラメータの自動最適化システムの開発を行う予定である。

参考文献

[1] Y. Honda, et. al, Optics Communications, p3108, Vol.282 (2009)