

Feedback Damping of Coherent Instability at S-LSR

Shinji Fujimoto^{1,A)}, Toshiyuki Shirai^{A)}, Akira Noda^{A)}, Hiromu Tongu^{A)}, Koji Noda^{B)}

^{A)} Institute for Chemical Research, Kyoto University

Gokasho Uji, Kyoto, 611-0011

^{B)} National Institute of Radiological Sciences

4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba, 263-8555

Abstract

A feedback damping system of S-LSR, which is a storage ring built at ICR Kyoto University, was tested. This feedback system was mainly composed from a signal pick up and a vertical kicker. This simple set-up is effective for suppression of vertical betatron sidebands which cause the loss of storage coasting proton beam. When the cool-stacked beam was lost, vertical betatron sidebands become large drastically. The current threshold for this phenomena was about 600[μ A] (2.3×10^9 particles). In this experiment, this feedback system could suppress the beam instability until about 800[μ A], and the beam was stable.

S-LSR 陽子ビーム不安定性のFeedback Damping

1. Introduction

S-LSRは京都大学化学研究所に建設された電子ビーム冷却器を備えた重イオンリングである。蓄積イオン種は陽子、 $^{12}\text{C}^{6+}$ 、 $^{24}\text{Mg}^{+}$ であり、現在陽子の蓄積、冷却に成功し $^{24}\text{Mg}^{+}$ が準備中である。陽子ビームを蓄積する際にはビーム強度を増すためにCOSY[1]やHIMAC[2]で行われているような電子ビーム冷却を併用したCool-Stacking(ビームが冷却を受けて運動量拡がりやビームサイズが十分小さくなった後にビームを入射、蓄積電流を積み上げていく手法)をしている。Cool-Stackingを続けていくとあるビームカレント以上でビーム不安定性によりビームが失われてしまう。S-LSRと同じく coasting proton beamについて生じたビーム不安定性については過去にも述べられている[3,4]が、原因についてはチェンバーウォールなどで生じた2次電子によるElectron Cloudとプロトンビームとの相互作用という見解もあり、シミュレーションも行われている[5]。[1]や[2]においてもこのビーム不安定性が観測されており、[2]ではスタックされたイオンの密度を下げるために垂直方向にRFでビームを誘起するなどのビーム不安定回避策がとられている。[1]ではある地点でビームのシグナルをピックアップし、その信号に基づいたFeedback信号をキッカーに送り、ビーム不安定性を抑えている(Feedback Dampingという)。この手法は他の研究所でも行われており、セットアップが比較的容易で効果が得られるものである。そこでS-LSRにおいてもビーム不安定性を抑制するためにこの手法を用い実験を行った。

2. Beam Instability and Feedback Damping at S-LSR

S-LSRにおいて電子ビーム冷却を行いながらビームスタッキングを行ったとき、ビームカレントが600[μ A]を越えるとビームスタッキングが難しくなる(この実験を行った際のビームパラメータは以下の表2-1に与える)。ビームをスタックしていく様子と蓄積ビームがロスする様子を図2-1に示す。縦軸は蓄積ビームカレントであり、横軸は時間である。図を見ると分かるように入射カレントがライフタイム(電子ビーム冷却併用で約40000秒)よりも早い時間(Decay time ~5秒)で下がっている。これは何らかのビーム不安定性が起きてビームが失われたものと考えられる。次にこのビームロスが起きた時点での静電ビームポジションモニタ(ESBPM)電極からのシグナルをオシロスコープで測定した結果を図2-2に示す。ビームロスが起きたときと同期してシグナルがバースト状(立ち上がり、立下りが~20[msec]程度)に大きくなっている。シグナルレベルのGrowth Rateは17.5[msec]であり、ビーム不安定性を示すカレント閾値は570[μ A]~600[μ A](粒子数 $2.2 \times 10^9 \sim 2.3 \times 10^9$)の間であった。

表2-1 Cool-Stacking実行時S-LSRパラメータ

Revolution Freq.	1.61 [MHz]
Proton Energy	7 [MeV]
Vertical Tune	1.21
Horizontal Tune	1.64
Electron Cooler Current	100 [mA]

¹ E-mail: fujimoto@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

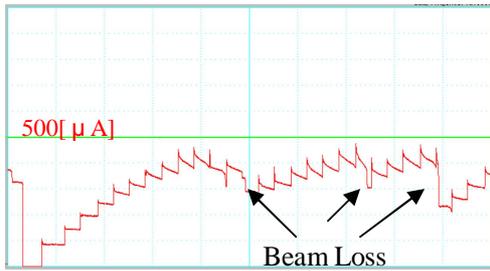


図2 - 1 Cool-Stacking: 縦軸 ビーム電流 (100[μ A/div]、横軸時間 (30[sec]/div) である。

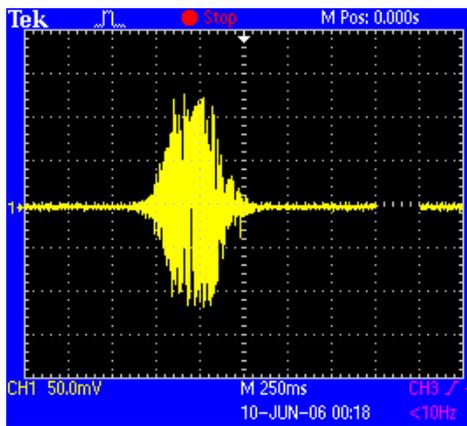


図2 - 1 不安定性によるパースト状シグナル：シグナルレベルが急激 (20[msec]オーダー) に大きくなり、同じく20[msec]オーダーで収束していく。このパーストが起きたときにビームがロスする。

このシグナルの周波数成分を調べるためESBPM電極のシグナルをSpectrum Analyzerを用いて測定した結果が次の図2 - 2である。ESBPM電極により測定されるシグナルは以下の式2 - 1で与えられる。

$$S_L = kx_0 I_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{j(2\pi n f_0 t + \phi_0)}$$

$$S_T = k\sqrt{\beta\epsilon} I_0 \left[\sum_{n=0}^{\infty} e^{j(2\pi(n+\nu)f_0 t + \phi_1)} + \sum_{n=1}^{\infty} e^{j(2\pi(n-\nu)f_0 t + \phi_2)} \right] \quad (2-1)$$

測定周波数域は0 ~ 100[MHz]、Reference Levelは -20[dBm]、10[dBm]/divである。なお、測定系は50[]で終端している。ビーム電流が大きくなるにつれて周波数が以下の式(2 - 2)で与えられるVertical Betatron Sidebandsが大きくなっていった(図2 - 2)。

$$f_\beta = (n \pm \nu) f_0 \quad (2-2)$$

ここでnは整数、νはチューン、f₀は周回周波数である。ビームロスが起きたときには図2 - 3に示される状態であり、各Vertical Betatron Sidebandがシグナル強度にして30[dBm]程度大きくなっている。特に周波数 ~ 90[MHz]の成分が大きくなっていることが分かる。

このビーム不安定性を抑制するためにシグナル

ピックアップ(P.U)とVertical Kickerを用いたVertical Feedback Damping System(VFS)を適用した。これはP.Uで検出したビームシグナルをパワーアンプで増幅、Vertical Kickerに導きビームをキックしてVertical betatron oscillationを抑制するシステムである。P.Uからのシグナルはケーブルを通過し適切なDelayを与えられてKickerのシグナルになる。このDelayはビームがP.U~Kicker間を飛行する時間にあわせて与えられる。P.U~Kicker間の関係はVertical betatron oscillationのPhase Advanceがπ/2に近くなるようにP.Uを選ぶと効率よくFeedback Dampingを行うことができる。このこともふまえて今回選んだP.Uの位置とKickerとのPhase Advanceは93度であった。

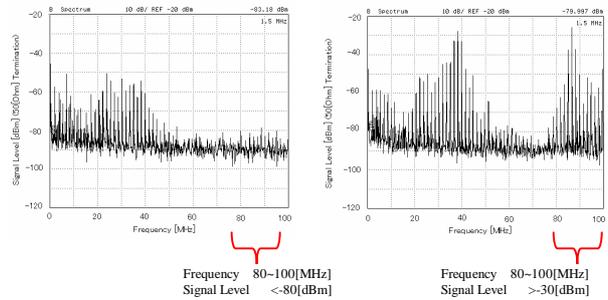


図2 - 2 左図、パースト信号出現前：Spectrum Analyzerで静電ビームポジションモニタの電極一枚からのシグナルを測定した。Transverse mode (Vertical) に高いシグナルレベルが現れている。ビーム電流は630[μ A]、横軸周波数は0 ~ 100[MHz]である。またReference Levelは -20[dBm] (50[]ターミネーション)、10[dBm]/divである。各Vertical Sideband強度は50[dBm] ~ 80[dBm]である。

右図、パースト信号出現時：測定周波数等の条件は図2 - 1と同じ。各Vertical Sideband強度が強いところで -30[dBm]まで大きくなっている。この現象によりビームロスがおこる。

3 . 実験

S-LSRでのFeedback Dampingのセットアップを次の図3 - 1に示す。各四重極電磁石のチェンバーに設置されているESBPMの1つ(ビーム入射ライン付近)をP.Uとして使い、ビームによるVertical Betatron SidebandをESBPMのUp、Down一枚ずつの電極からP.Uシグナルを得る。得られたシグナルをNF社製のPre-amplifier(Input Impedance 1[M], Band width 300[Hz] ~ 100[MHz]、ゲイン46[dB])で増幅し、RF-Combinerへ導く。Up-DownのシグナルをPower Amplifier (出力1[W]、ゲイン20[dB])で増幅し、Variable Attenuator、Variable Delayへと導いてキッカー信号にする。この際、シグナルをピックアップした粒子にキッカーの位置で正しくFeedbackをかけるためにケーブルによるDelay

(155[nsec])を与えておく。以上のセットアップで Feedback Dampingを行った。

4. 実験結果

図4-1にフィードバック試験の結果を示す。図は31番目のハーモニクスを観測しており、ビームカレントは500[μA]である。Feedbackオフのとき周波数が51.89[MHz]と51.15[MHz]のVertical betatron Sidebandが現れているが、Feedbackオンでその成分は抑制されている。その代わりに50.92[MHz]の成分を持つHorizontal betatron Sidebandが出現しているが、ビームロスにはいたらなかった。このフィードバックシステムを用いることによりcool-stackされた陽子ビームの蓄積電流を~600[μA]から~800[μA]まで伸ばすことに成功し、この時点でビームは全く不安定性を示さなかった。

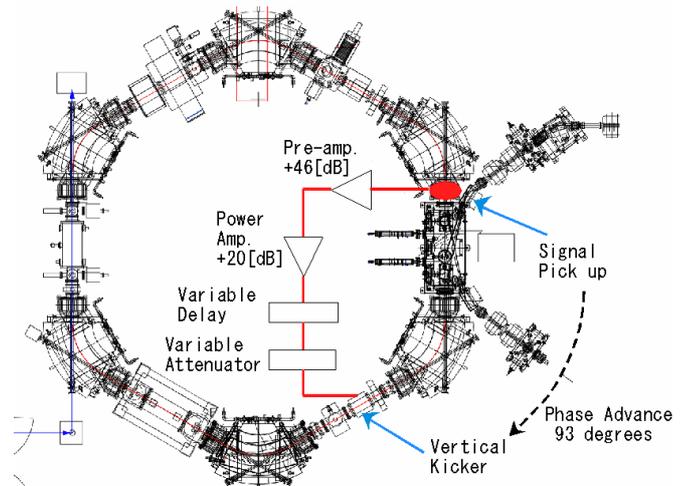


図3-1 S-LSR概観図およびFeedback Dampingセットアップ：S-LSRは周長22.56[m]の重イオン蓄積リングである。静電ビームポジションモニターは各四重極電磁石のチェンバーに設置されている。この内の1つをDampingのP.Uとして使用する。P.Uとキッカー間でのVertical Betatron振動のPhase Advanceは93度であり、プロトンビームの飛行時間は155[nsec]である。

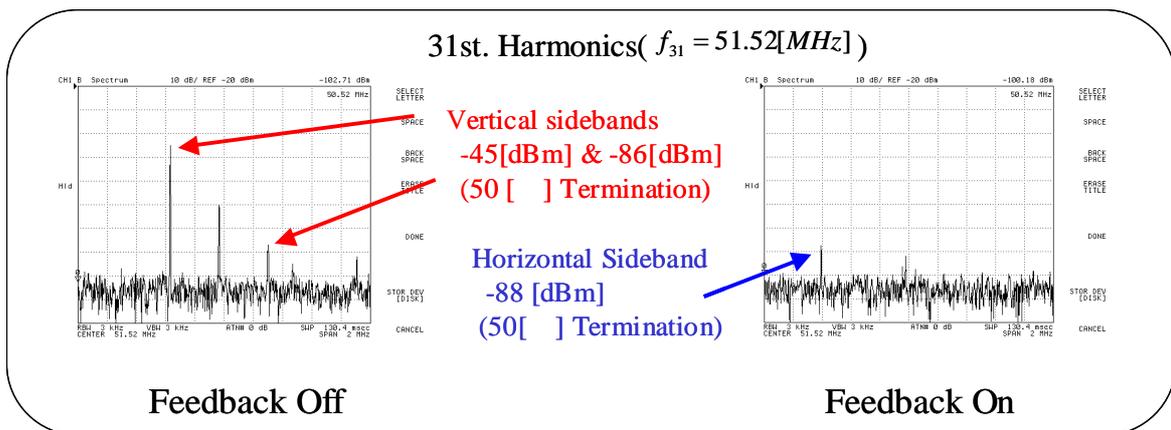


図4-1 Feedback OnとOffの信号強度比較：縦軸信号強度 (Ref.Lev.-20[dBm]、10[dBm/div]、50[]Termination)、横軸周波数 (Center Frequency51.52[MHz]、200[kHz/div])である。Feedbackを入れることによりビームロスの原因となるVertical betatron sidebandを約40[dBm]抑える(よってパースト信号を抑制)ことに成功している。その代わりにHorizontal betatron sidebandが出現しているが、このビームカレントでは、ビームロスに繋がっていない。

謝辞

本研究を行うにあたり
高輝度光科学研究センター 中村剛氏、小林和生氏、高エネルギー加速器研究機構 外山毅氏、加速器エンジニアリング株式会社 渋谷真二氏、放射線医学総合研究所 鳥飼 幸太氏
以上の方々に貴重なご意見、ご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] V.Kamerdzhev, et al., Nucl. Instr. Meth. A **532** (2004) 285-290.
- [2] T.Uesugi, et al., Nucl. Instr. Meth. A **545** (2005) 45-56.
- [3] H.G. Hereward, CERN Report No. 71-15, 1971.
- [4] E. Keil and B. Zotter, CERN Report No. CERN-ISR-TH/71-58, 1971.
- [5] K. Ohmi, et al., PR ST-AB, Vol **5** 114402 (2002)
- [6] S.Koscielniak and H.J. Tran "Properties of a Transverse Damping System, Calculated by a Simple Matrix Formalism," 1993 IEEE Particle Accelerator Conference, Dallas, TX.