

PHASE STABILITY MEASUREMENT OF A CONVENTIONAL ANALOG ϕ -A TYPE LOW-LEVEL RF CONTROLLER

R. Nagai^{1(A)}, M. Sawamura^{A)}, R. Hajima^{A)}, N. Nishimori^{A)}, N. Kikuzawa^{A)}, H. Iijima^{A)}, T. Nishitani^{A)}, E. Minehara^{B)}

^{A)}Energy Recovery Linac Development Group, Japan Atomic Energy Agency
 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

^{B)}Advanced Photon Source Development Unit, Japan Atomic Energy Agency
 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

Abstract

For an FEL application and an ERL light source, high-stability of accelerator RF amplitude and phase is required. A low-level RF controller (LLC) of the JAEA-ERL has been improved to ensure high-stability accelerating RF field. The LLC is a conventional analog ϕ -A type controller with following functions: the feedback gain, loop-offset phase and time constant can be varied during operation to obtain optimum parameters for the high-stability RF field, all the circuits are contained in a temperature controlled oven. The LLC performance is tested for a 499.8MHz superconducting cavity and a 1300MHz copper cavity. The phase and amplitude stabilities of the 499.8MHz superconducting cavity within a 1ms macro-pulse are 0.0055deg-rms and 7.64×10^{-5} , respectively. For the 1300MHz copper cavity, pulse mode and CW mode were tested. In the case of pulse mode, the phase and amplitude stabilities are 0.011deg-rms and 7.64×10^{-5} , respectively. In the case of CW mode, the phase and amplitude stabilities are 0.011deg-rms and 6.68×10^{-5} , respectively

アナログ位相・振幅制御型RF制御装置の位相安定度測定

1. はじめに

利用実験に供することが出来る安定な自由電子レーザー(FEL)やエネルギー回収型リニアック(ERL)をベースとした放射光源を実現するためには加速電場の非常に高い安定性が求められる。原子力機構で開発を進めているERL-FELのために、アナログ位相・振幅制御型ローレベルRF制御装置の改良を行い1msのマクロパルス内で0.06deg-rmsの位相安定度がすでに得られている¹⁾。このローレベルRF制御装置の汎用性と安定度を向上させ、次世代放射光源用のERLにも対応できるように以下のような改良を加えた。

- ① フィードバック時定数のうち抵抗のみが可変だったが静電容量も可変にした
- ② 様々な周波数に対応できるように周波数コンバータとフィルタを付加できる回路構成にした
- ③ 位相と振幅のフィードバックゲート信号を独立にした

このローレベルRF制御装置の性能を評価するために499.8MHzの超伝導空洞および1300MHzの銅製の空洞を負荷とした場合の位相安定度を測定した。超伝導空洞についてはパルスモード(JAEA-ERLでの運転モード)で、ローレベルRF制御装置内のモニタ回路により計測を行った。銅製の空洞についてはパルスモードとCWモードについての計測を行い、

CWモードについてはスペクトルアナライザ(Tektronix RSA230)による位相雑音の測定から位相安定度を算出した。

2. 位相安定度の測定

2.1 499.8MHz超伝導空洞の位相安定度

JAEA-ERLで使用している499.8MHzの超伝導空洞を負荷としてRF制御装置の試験を行った。RFは繰返し10Hz、幅2msで空洞に投入され、この後半の1msを加速に使用しているのでこの部分の位相安定度の測定を行った。図1に示すように、通常の運転の場合と同様に、基準信号発生器(Hewlett-Packard 8665A)からの信号をRF制御装置に入力し、400W増幅器(THAMWAY T145-56AAA)、50kW-IOT(CPI CHK2500W5508)をとおして超伝導空洞にRFを投入し、超伝導空洞内のRFモニタ信号をRF制御装置に戻す構成で試験を行った。また、モニタ装置はデジタル計測器(Yokogawa WE7000)およびPCで構成され、RF制御装置のモニタ端子から出力される位相および振幅の信号をデジタル化しPCに取り込んでいる。PCでは安定度をリアルタイムで計算し表示している他に、測定データの記録を行っている。RFを投入した状態で安定度をリアルタイムでモニタしながらRF制御装置のループオフセット位相、フィードバックゲイン、フィードバック時定数の調整を行った。

¹ E-mail: nagai.ryoji@jaea.go.jp

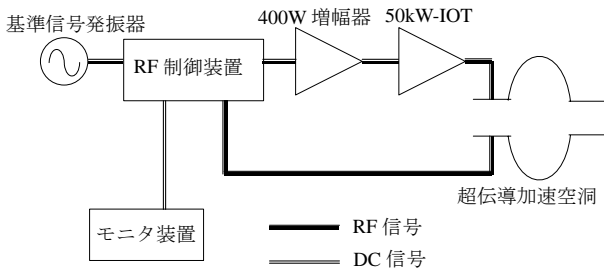


図1：499.8MHz超伝導空洞の位相安定度計測

この結果、図2に示すように位相安定度は0.0055deg-rmsが得られた。また、振幅の安定度は 7.64×10^{-5} rmsであった。位相信号デジタル変換の際のビットエラーが見られるので実際の安定度はさらに良い値であったと思われる。

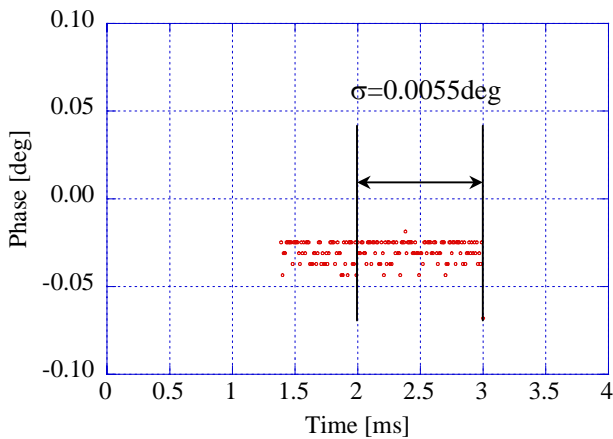


図2：位相安定度計測結果(499.8MHz)

2.2 1300MHz銅製試験空洞の位相安定度

ERL放射光源で使用される1300MHzでの試験を行うために銅製の試験空洞を作成し、パルスモードおよびCWモードでの位相安定度を測定した。図3に示すような回路構成で試験を行った。周波数変換を行うために基準信号発生器(Hewlett-Packard 8341B)と同期を取った局所発振器(Agilent 8662A)で1300MHzと499.8MHzの差の800.2MHzをRF制御装置へ入力している。RF制御装置の出力は5W増幅器(Mini-Circuits ZHL-4240W)を通して銅製の試験空洞へ入力している。また、CWでの試験の際に位相雑音を計測するためにRF制御装置へ入力している空洞のRF信号の一部をスペクトルアナライザ(Tektronix RSA230)でモニタしている。

パルスモードでの測定はRFを幅3ms、繰り返し10Hzで空洞に投入してパルスの後半1msの安定度を計測した。図4に示すように位相の安定度は0.011deg-rmsであった。また、振幅の安定度は 7.64×10^{-5} rmsであった。超伝導加速器についての測定と同様に位相信号をデジタル化する際のビットエラーが見られるので、実際の安定度はさらに良い値であったと思われる。

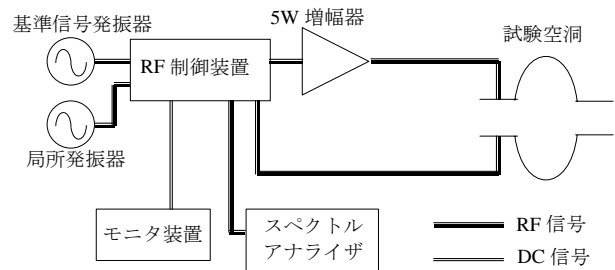


図3：1300MHz銅製試験空洞の位相安定度計測

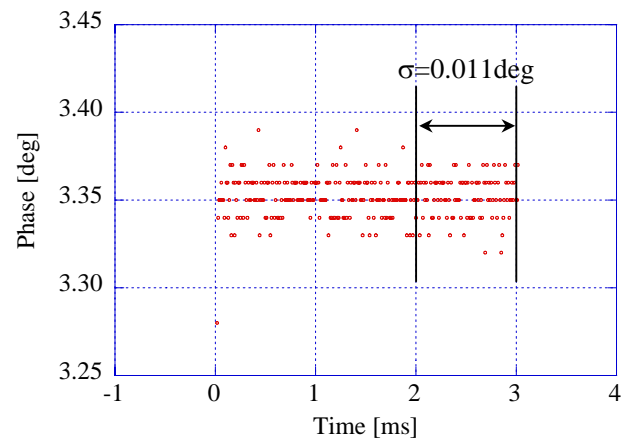


図4：位相安定度計測結果(1300MHz)

CWモードについてもリアルタイムで安定度をモニタしながらフィードバックパラメータの調整を行った。その結果、ローレベルRF制御装置のモニタ信号での位相および振幅の安定度はそれぞれ、0.011deg-rmsと 6.68×10^{-5} rmsであった。また、CWモードについては空洞内のRF信号をスペクトラムアナライザで観測することにより位相雑音から位相安定度を算出した。位相安定度(位相分散) $\sigma\phi$ と位相雑音 $L(f)$ との関係は

$$\sigma\phi = \left(\int_{f_1}^{f_2} 2L(f) df \right)^{1/2} \quad [rad]$$

で表される^[2]。この計測に用いたスペクトルアナライザの測定精度は-100dBc/Hz程度であり、また、基準信号発生器自身の位相雑音も十分に小さくなかったので、

$$\sigma\phi = (\sigma\phi_m^2 - \sigma\phi_0^2)^{1/2}$$

として発信機とスペクトルアナライザの位相雑音を差し引いて位相安定度を求めた。ただし、 $\sigma\phi_m$ は空洞の位相雑音から求めた位相分散、 $\sigma\phi_0$ は基準信号発生器の位相雑音から求めた位相分散である。計測した位相雑音を図5に示す。図5下図は基準信号発生器の位相雑音である。この結果、位相安定度は0.013deg-rmsでありローレベルRF制御装置のモニタ信号での測定とほぼ同じ値であった。図5の二つの位相雑音を比べても差がみられないことからこのような非常に高い安定度(0.01deg-rms程度)の計測を行うにはスペクトルアナライザおよび発振器自身の位相雑音が十分に小さい必要がある。

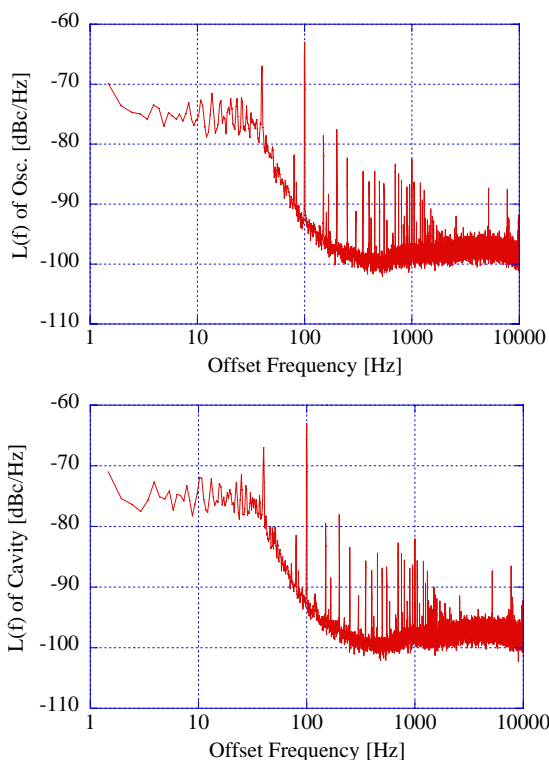


図5：空洞（上）および発振器（下）の位相雑音

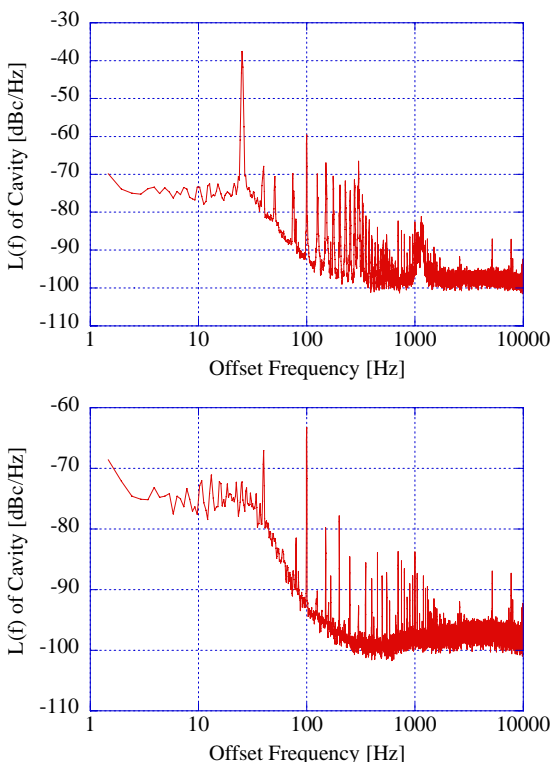


図6：FB-Off（上）およびOn（下）時の位相雑音

ERLで最も問題となる擾乱はマイクロフォニックと呼ばれる加速空洞の微小な振動によるものである。この振動を模擬するために、機械的振動を試験空洞に与えて計測を行った。この場合の位相雑音を図6に示す。振動を与えフィードバックをOffの状態では25Hz付近に大きな位相雑音(-37dBc/Hz)がみられる。フィードバックをOnにすると位相雑音は発振器のものと同様(-75dBc/Hz)になる。このことから、この周波数の位相のフィードバックゲインは38dB以上であることが分かる。また、それぞれの位相安定度はフィードバックOffの場合が0.988deg-rmsであったのに対してフィードバックOnでは0.034deg-rmsであった。

3. まとめ

499.8MHzの超伝導空洞および1300MHzの銅製の空洞を負荷とした場合の位相安定度の測定からアナログ位相・振幅制御型ローレベルRF制御装置で様々な負荷に対して0.01deg-rms程度の位相安定度が実現できることが実証できた。

位相雑音についての詳しい測定を行うには精度の高い(位相雑音の小さい)計測系が必要であり、精度の高い計測系で再度この計測を行う予定である。

参考文献

- [1] R. Nagai, et al., Proc. of the Annual Meeting of Part. Acc. Soc. (2004) 293-295.
- [2] E. Ezura, 'Characterization and Measurement of Frequency Stability' KEK Report 2000-6.