

Measurement of phase and amplitude variations in RF pulses of a linac and its evaluation with the electron beam

Yukiyoshi Kon¹, Ryukou Kato, Shigeru Kashiwagi, Shoji Suemine, Goro Isoyama
Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

Abstract

The amplitude and the phase of the pulsed RF power for the L-band electron linac at the Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University are measured with a diode detector and a double-balanced mixer. They are expected to be constant in the RF pulse because undulation of the flat-top of the high voltage pulse for klystron is reduced within $\pm 0.13\%$, but the measured values were much larger than expected. In order to solve the contradiction, we have conducted experiments to measure the energy gain of the linac as a function of time in the RF pulse, which has the $4\mu\text{s}$ flat-top, using an electron beam with the 5ns duration and have found that the energy gain varies appreciably in the RF pulse. In an offline calibration experiment of the devices after the RF measurement, it turns out that the RF phase varies monotonously by 5.5° in $2.7\mu\text{s}$, which agrees quite well with the measured RF phase meter in a successive experiment. The energy gain calculated with the measured RF amplitude and the phase is qualitatively in agreement with the measured one, reasons of which are still in question.

ライナックRFパルス中の位相・振幅変化の計測と電子ビームを用いたその評価

1. はじめに

大阪大学産業科学研究所ではLバンド電子ライナックを用いて遠赤外領域の共振器型FELの研究を行っている。これまで波長 $30\sim 150\mu\text{m}$ でのレーザー発振に成功しているが、RFマクロパルス長が $4\mu\text{s}$ に制限されていたこと、加速管のフィリングタイムが $2\mu\text{s}$ もあったことなどから、光の増幅が約50回に制限され、FEL出力の飽和を実現するには至らなかった。2年前に完了したLバンドライナックの改造に際して、RFパルス長が $4\mu\text{s}$ のノーマルモード以外に $8\mu\text{s}$ のロングパルスモードと呼ぶFEL用の運転モードをモジュレーターに追加した。クライストロンからの出力されるRFパワーの振幅と位相を一定に保つために、クライストロンモジュレーター電源の出力パルス内電圧変動は $\pm 0.13\%$ 以内に抑えた^[1]。この改造によりFEL出力は飛躍的に増大し、出力飽和に至ることが期待される。我々は現在、このモジュレーターのロングパルスモードを利用した発振実験用のマルチバンチビームの試験調整を行っている。

これまでの試験では長パルスモードでの電子エネルギーを期待したようには揃えることができなかった。そのため、RFマクロパルス内の位相・振幅等の安定性の評価を行うことにした。クライストロンモジュレーターのパルス内電圧変動は小さいのでRFパルスの位相と振幅の変化は小さいと期待される。本研究では、ダブル・バランスト・ミキサー(DBM)と検波器を用いてRFパルス内での位相・振幅変化の測定を行った。次に、短い電子パルス(過渡

モードビーム)を用いて、RFパルスに対する電子パルスの入射タイミングを変えながらエネルギースペクトルを測定した。これをRFパルスの位相・振幅変化から見積もられるエネルギー利得と比較し、実際の位相・振幅変化を評価する。

2. RFパルスの測定

2.1 RFパルスの位相と振幅の測定

今回はクライストロンモジュレーターをノールモードで運転し、RFパルス長 $4\mu\text{s}$ で測定を行った。主加速管に入力されるRFの位相の測定ではDBM

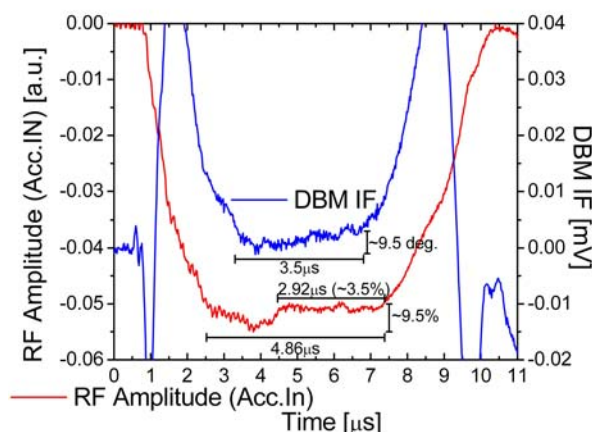


図1 主加速管に入射されるRFパルスの振幅と位相

¹ E-mail: kon25@sanken.osaka-u.ac.jp

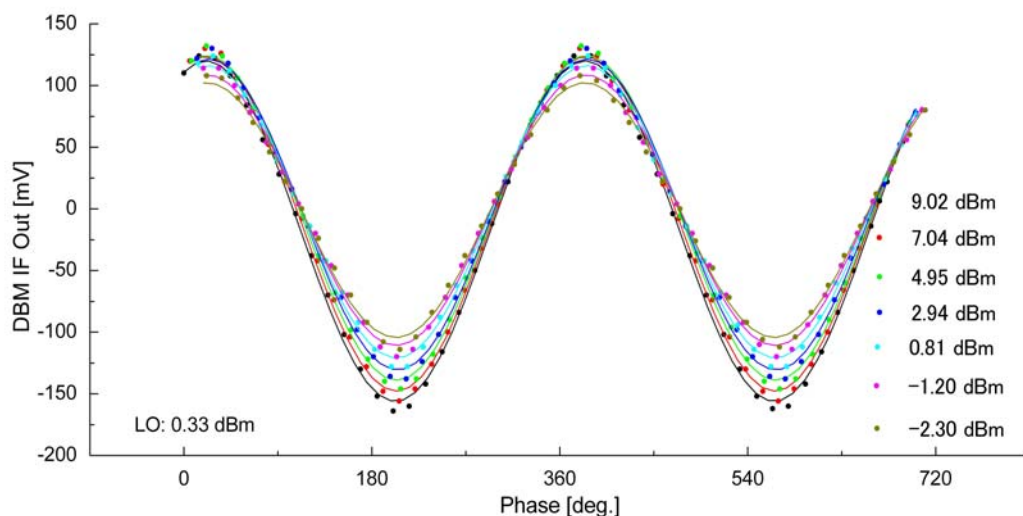


図2 DBM LO端子を基準としたRF端子の位相差に対するIF端子からの出力の変化（LO端子：0.33dBm、RF端子：-2.30dBm~9.02dBm）。測定点は点で表され、それを三角関数でフィッティングしたものが実線で表される。

を用い、基準発信器のRFをLO端子に、主加速管に入力されるRFを分配してRF端子に各々入力し、IF出力から位相変動を測定した。またRF振幅は、同様に分配された主加速管に入力されるRFを、検波器を用いて同時に測定した。この検波器とDBMの出力を図1に示す。検波器の出力の変化は4.5 μ s~7.4 μ sの間で3.5%、2.5 μ s~7.4 μ sの間では9.5%の変化がある。DBMのIF出力の変化は主加速管に入力されるRFの位相変化のsinをとったものに相当する。図1に示されるように、RF振幅が平坦な部分でも、位相はある程度の傾斜を持って変化しており、3.3 μ s~6.8 μ sの間での位相の変化は基準の1.3GHzのRFに対しておよそ9.5度であった。またその前後では、クライストロンモジュレーターの高圧パルスが急速に立ち上がり・立ち下がることにより、急激に位相が変化している。平坦部での位相変化の測定値は、クライストロンモジュレーター電圧の変化量から推定される位相の変化 ± 0.6 度に比べて非常に大きい。

2.2 DBMの特性

DBMのIF端子からの出力を位相差 ϕ で表すと
$$\phi = \sin^{-1}(2 \text{ IF} / \text{AB}) \quad (1)$$
で、ここで基準発信機のRF振幅をA、主加速管へ入射されるRF振幅をB、DBMからの出力をIFとする。これらの変数を知ることによって位相差が正確に求めることができる。そこで、DBMの動作特性を知るために、実際の測定に擬似的な測定系を組み、移相器を用いてRF端子入力に位相差を作ってそのときの出力IFの変化を調べた。位相に関しての測定の誤差は1.5度以下で行った。このとき、LO端子には0.33dBmの入力を、RF端子には-2.3dBm~9.02dBmの入力をした。

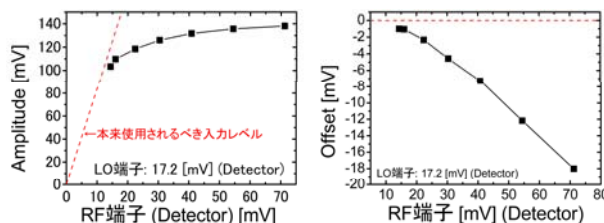


図3 (左) RF端子入力レベルに対するフィッティングデータの振幅の変化。(右) RF端子入力レベルに対するフィッティングデータのオフセットの変化

その結果を図2に示す。これを見ると、中心線は負の方向へずれていて、また振幅の大きさは上下対称になっていないことがわかる。RF端子入力レベルそれぞれについて三角関数でフィッティングしたデータの振幅の変化とオフセットの変化を図3に示す。

ここで、DBMのLO端子入力はダイオードのスイッチをオンにするためのものでRF端子入力に対して十分に大きくなければならないことがわかった。適正レベルとしてLO端子に+5dBm以上、RF端子には0dBmより十分に小さい値を入力しなければならない。それに対して測定はLO端子に検波器での値17.2mV、0.33dBmしか入力されず、RF端子には約7dBmも入力し使用していた。したがって、振幅の大きさは実際より小さな値を出力し、IF端子からの出力の中心値もオフセットをはいた出力をしていた。

2.3 位相変化の導出

しかし(1)式で、IFの出力を変数に用いることができる。それは、位相を360度すべて回すことによってDBMのIFが掃引する出力からRF振幅の変化

を得ることができ、これを変数Bに用いることによって振幅が小さく出力されている効果は消すことができる。また、IF,Bの変数にそれぞれ求められたオフセットを補正する。ここで、DBM IFから得られた掃引線とそれにオフセットを補正した振幅の変化を図4に示す。

こうして(1)式から位相差が求められた。同時に、この位相差を確認するために借りた位相検出器のデータとともに図5に示す。位相の変化は双方とも3.8 μ s~6.5 μ sで約5.5度であった。二つの測定で位相変化がほぼ同じだったことから、位相変化は正確に求められたことがわかる。これは2.1で見積った位相の変化より小さい。

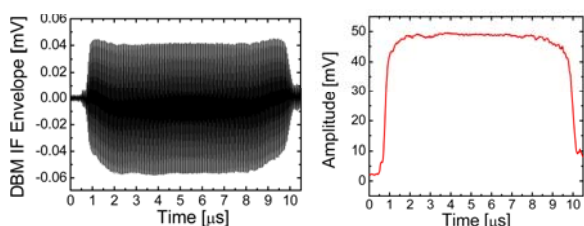


図4 (左) RF端子側で位相を360度すべて回すことによってDBMのIFの出力が掃引する線
(右) DBM IFの掃引線から求めたRF振幅の変化

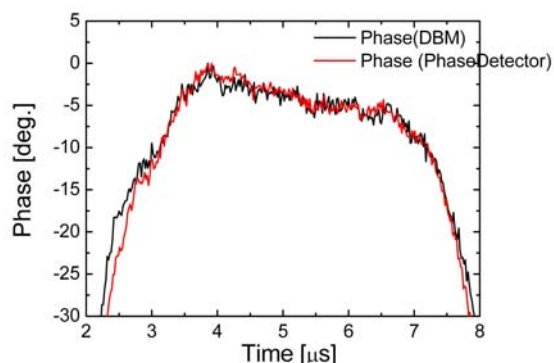


図5 DBMから求めた位相の変化と位相検出器から得られた位相の変化

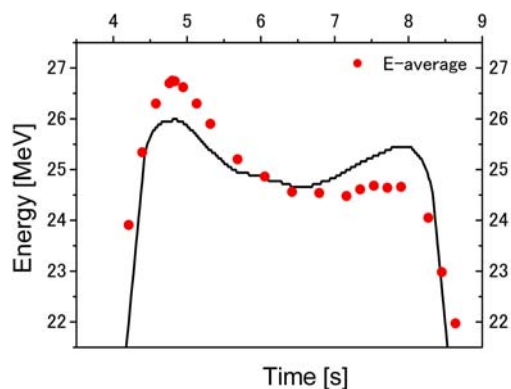


図6 電子ビームの測定された平均のエネルギー利得 (点) と見積られたエネルギー利得 (実線)

3. 振幅・位相の変化の評価

位相が一定である領域が見られなかったことと、予想外に位相の変化が大きく観測されたことなどから、実際に電子ビームを加速したときのエネルギー変化からこれらの結果を確認することにした。ビーム実験では、マクロパルス長5ns、電子バンチ間隔0.77nsの過渡モードを用いた。エネルギースペクトルの測定は、ビームライン下流にある運動量分析電磁石を用いた。電子ビームのRFパルスに対する入射タイミングを変えながら、主加速管内での電子ビームのエネルギー利得の変化を測定した。図8にその測定結果を示す。また、前節で求められた位相変化から主加速管に入射されるRFパルスの電場を求め、それぞれの時刻から主加速管のフィリングタイム2 μ s廻り積算することで電子ビームが得るエネルギーを求めることができる。これも図6に示す。位相は6 μ sのタイミングで最大エネルギーを与える位相を選んでいる。この結果を見ると、計算から見積ったエネルギー利得は先頭1 μ sの間で3%強大きく、後方1 μ sの間では3%弱小さい。

4. まとめ

振幅の変化は4.86 μ sで9.5%、位相の変化は2.7 μ sで5.5°であった。これらは、クライストロンモジュレーターの電圧変動の安定性から見ると大きい。また、見積った電子ビームのエネルギー利得は実測値とは一致しなかった。電子ビームを用いたRFパルスの位相・振幅変化の評価としては、その変化量を裏付けることはできなかった。これには、加速管前部での電子ビームの位相スリップなどを考慮してみる必要がある。いずれにしても、位相と振幅の変化は期待される安定性は満たしておらず大きな変化が見られたので、今後はRFパルス内の位相・振幅の安定化を図るため、フィードフォワード制御を行う予定である。

参考文献

[1] R.Kato, et al., “阪大産研Lバンドライナックの改造とビーム安定化”Proceedings of the 1st Annual Meeting of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, Aug. 4-6, 2004