

# IQ 変調器を用いた高周波パルスの振幅位相平坦化による電子ビームの高品質化

## AMPLITUDE AND PHASE CONTROL OF RF PULSE USING IQ MODULATOR FOR REALIZING HIGH QUALITY ELECTRON BEAM

山田志門<sup>#</sup>, 柏木茂, 長澤育朗, 南部健一, 高橋健, 日出富士雄, 三浦禎雄,  
武藤俊哉, 鹿又健, 柴田晃太郎, 濱広幸

Shimon Yamada<sup>#</sup>, Shigeru Kashiwagi, Ikuro Nagasawa, Kenichi Nanbu, Ken Takahashi, Fujio Hinode,  
Sadao Miura, Toshiya Muto, Ken Kanomata, Kotaro Shibata and Hiroyuki Hama  
Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

### Abstract

We are conducting fundamental studies on generation of intense coherent radiation from short electron pulses at t-ACTS, Tohoku University. The accelerator system is composed of a thermionic cathode RF electron gun, the alpha magnet and an accelerating structure. A short electron bunches of approximately 100 fs can be generated by velocity bunching in traveling wave accelerator. Variation in amplitude and phase of input RF power for RF gun cavities affect the bunch length of electron beam. We installed an IQ modulator to the low-level RF (LLRF) system to control the amplitude and phase of RF power. By making a flat RF pulse, the short electron bunches can be produced by velocity bunching over one RF pulse. Energy spectrum of the beam has been measured before and after acceleration. In this paper, the details of the RF amplitude and phase modulation systems using an IQ modulator implemented in t-ACTS and the results of beam experiment will be described.

### 1. はじめに

東北大学電子光物理学研究センターでは、試験加速器 t-ACTS (test Accelerator as Coherent Terahertz Source) を用いて、テラヘルツ帯域のコヒーレント放射発生に関する研究が進められている [1,2]。t-ACTS は独自に開発した独立二空洞型熱陰極高周波 (RF) 電子銃を電子源とし、進行波型加速管中における Velocity Bunching により、100 fs 以下の極短電子パルスの生成が可能である。t-ACTS の電子ビームパルスは、全体の時間幅が約 3  $\mu$ s で S 帯域の周期 (350 ps) で連なるマルチバンチビーム構造をしている。そのため、高周波電子銃および加速管に供給する高周波パルスの振幅と位相の変動は、電子ビームのエネルギー拡がりや短バンチ生成に大きな影響を与える。

本研究では、t-ACTS のローレベル高周波システム

に直交 (IQ) 検出器および変調器を導入し、RF 電子銃及び加速管に供給する高周波パルスの振幅と位相の平坦化を行なった [3]。これにより、1 つの高周波パルス内で Velocity Bunching によるバンチ圧縮が均一に実行され、運動量拡がり狭い電子パルスを生成する。そして、最終的にはマルチバンチ全体で高強度のコヒーレント放射の発生が期待できる。本学会では、t-ACTS の高周波振幅・位相変調システム及び、極短パルス電子ビームからのコヒーレント放射を用いた電子ビーム評価実験について報告する。

### 2. 極短パルス電子ビーム生成

t-ACTS では、進行波型加速管中での Velocity Bunching [4] によりサブピコ秒の極短パルス電子ビームを生成する。Velocity Bunching では、独立二空洞 RF 電子銃で縦方向位相空間分布が制御された光速よりも僅かに遅い電子ビームを、進行波型加速管の高

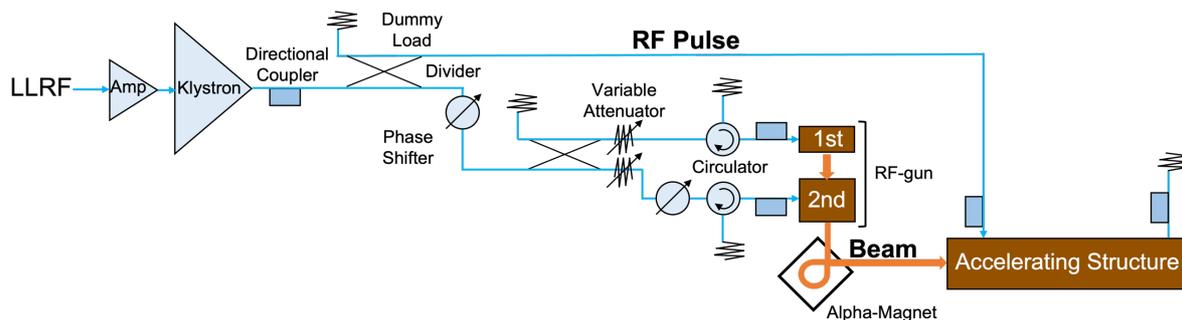


Figure 1: High-power RF systems.

<sup>#</sup>syamada@lms.tohoku.ac.jp

周波ゼロクロス付近に入射する。入射した電子ビームには、高周波によって前方が低エネルギー、後方が高エネルギーとなるような速度変調が与えられる。この速度差によって、電子ビームの後方部が前方部に追いつくために、バンチ圧縮が行われる。また、電子ビームは高周波に追い越される形となるため、ゼロ位相から加速位相側へと位相スリップを起し、バンチ圧縮されながら、全体として加速される。最終的なバンチ長は、進行波加速管に入射する時のビーム縦方向位相空間分布と加速管への入射位相によって大きく変化する。

### 3. t-ACTS の高周波システム

#### 3.1 ハイパワー高周波システム

Figure 1 に t-ACTS のハイパワー高周波システムの構成図を示す。基本加速周波数は、S バンドの 2856 MHz である。t-ACTS では、クライストロンで増幅された RF パワーを、2 つに分割した後、電子銃と加速管のそれぞれに供給している。t-ACTS の高周波電子銃は、独自に開発した熱陰極高周波電子銃であり、第 1 空洞と第 2 空洞に励振される電場の振幅と位相を独立に制御することができる。これにより、電子銃内部でのビームの縦方向位相空間分布を制御することができ、Velocity Bunching に適した縦方向位相空間分布を持つビームを生成することができる。

#### 3.2 ローレベル高周波システム

t-ACTS のローレベル高周波システムの構成を Fig. 2 に示す。今回、新たに IQ 検出器および変調器を導入した。

基準 RF 発振器からの CW 高周波は、RF スイッチによりビーム繰り返し (2 Hz) の約 3.5  $\mu$ s の時間幅に切り出される。この RF パルスの振幅と位相を、IQ 変調器を使い制御する。IQ 変調器に入力する直交 2 成分信号は、任意波形生成器 (AWG : Arbitrary Waveform Generator) を用いて作り出す。

一方、RF の振幅および位相の検出は、クライストロン出口、RF 電子銃空洞および加速管入力部の導波管に取り付けてある方向性結合器からの信号を IQ 検出器へ入力している。IQ 検出器の直交 2 成分の出力信号をオシロスコープで測定し、計算機 (PC) で振幅と位相へと変換する。

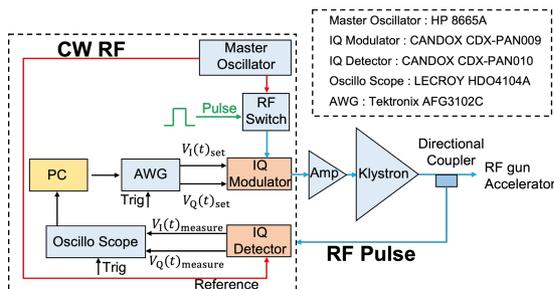


Figure 2: Low-level RF systems.

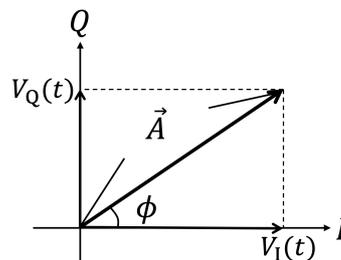


Figure 3: Constellation diagram.

### 4. IQ 変調器を用いた高周波パルス平坦化

ここでは、今回どのようにクライストロン出口の高周波波形を制御の手順について説明する。

IQ の I は同位相成分を意味する In-phase を表し、Q は垂直位相成分を意味する Quadrature-phase を表している。IQ 変調を行うことで、直交する 2 つのベクトル ( $V_I, V_Q$ ) を合成し任意の振幅 ( $|\vec{A}|$ ) と位相 ( $\phi$ ) を持つ RF を得ることが可能である。Figure 3 に IQ 成分と RF の振幅及び位相との関係を示す。IQ 変調を用いることで得られる利点は、振幅及び位相をそれぞれ独立に操作できることにある。

$$|\vec{A}| = \sqrt{V_I^2 + V_Q^2} \quad (1)$$

$$\phi = \sin^{-1} \frac{V_Q}{|\vec{A}|}, \cos^{-1} \frac{V_I}{|\vec{A}|} \quad (2)$$

IQ 検出では測定する RF と同じ周波数のリファレンス ( $\omega_{ref}$ ) を掛け合わせることで、I 成分及び Q 成分を取り出すことができる (Fig. 2)。今回、IQ 検出器のリファレンス信号は、基準 RF 発振器の出力を使用した。

Figure 4 に IQ 変調によりクライストロン出口の RF に補正をかける際の流れを示した。最初に IQ 検出により測定された RF の振幅と位相に対して、目標値を定める。次に目標値と実際に測定された値との差分を計算し、そこにある任意の定数をかけて補正量を決定する。定めた補正量を AWG へとロードし、新たな波形が IQ 変調器にセットされ、クライストロ

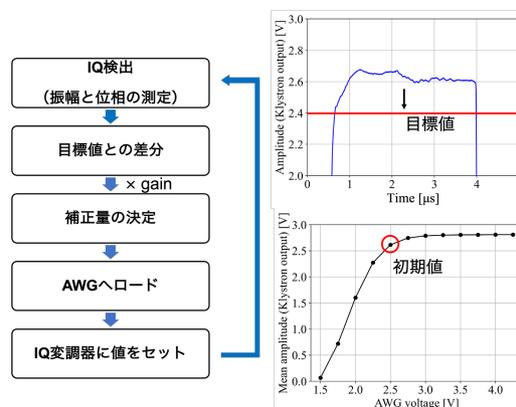


Figure 4: Flat rf pulse generation process using IQ modulation.

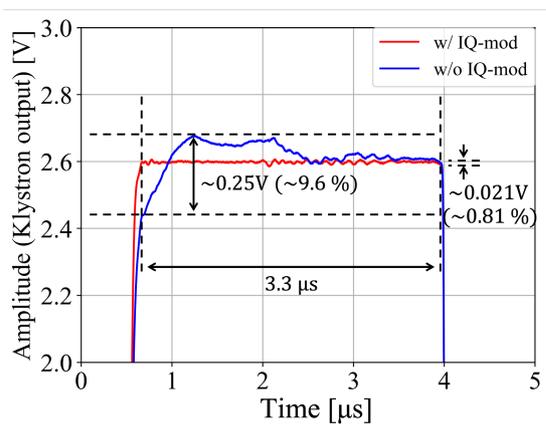


Figure 5: Amplitude of klystron output RF pulses with and without IQ modulation.

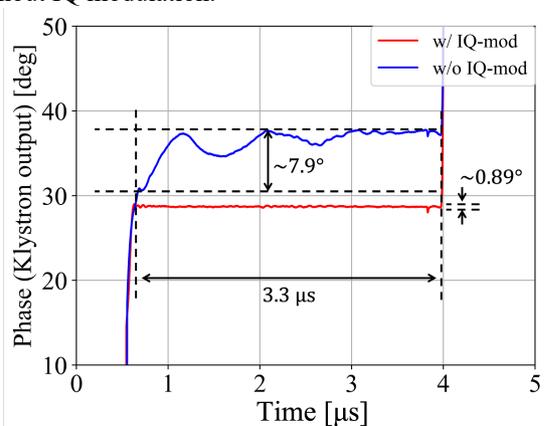


Figure 6: Phase of klystron output RF pulses with and without IQ modulation.

ン出口の RF に補正をかけることができる。AWG の初期設定電圧は、Fig. 4 右下の赤丸で示した 2.5V に設定した。このゲインカーブのグラフからも分かるように、AWG の出力電圧に対してクライストロン出口が飽和特性を示す直前の部分であり、AWG 電圧に対して RF 振幅に変化があることに加え、RF 出力も大きい。

次に、Fig. 5 及び Fig. 6 に IQ 変調の有無によるクライストロン出口の RF の違いを示した。Figure 5 では振幅、Fig. 6 では位相について示している。IQ 変調により RF に補正をかけることで、パルス内の変動を振幅に関しては peak to peak で約 9.6% から約 0.81% に、位相においては約 7.9° から約 0.89° に減少させることができた。

## 5. 電子ビーム IQ 変調システム評価

### 5.1 加速前の電子ビーム評価

ここでは、加速管に入射する前の電子ビーム評価実験の結果について述べる。Figure 7 に加速管に入射される前の電子ビームのパルス内運動量分布を示した。この測定は、熱陰極高周波電子銃の出口に設置してあるアルファ電磁石を用いて行った。アルファ電磁石に入射した電子ビームは運動量に応じた円を描くため、可動式のスリットを円の中心から半

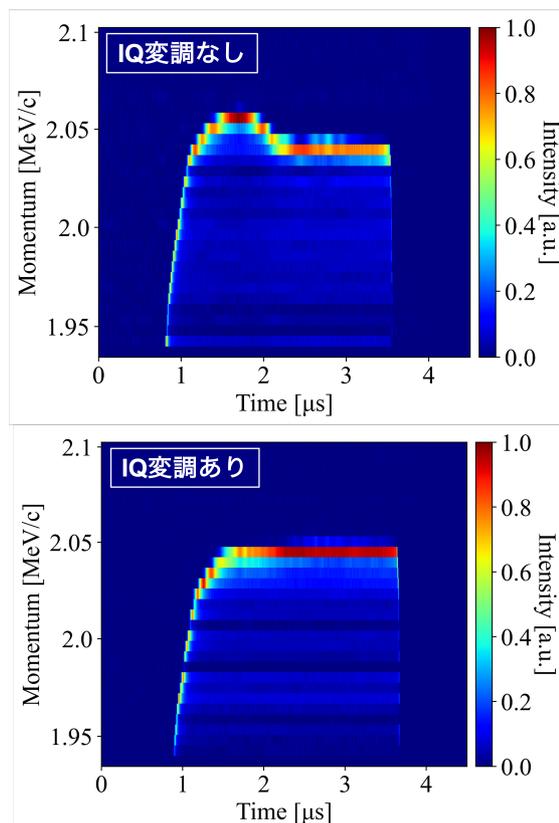


Figure 7: Measured energy profile of multi-bunch beam with and without IQ modulation before acceleration.

径方向に挿入することで、運動量の小さな電子を遮ることができる。従って、スリットの挿入量を電子の運動量へと換算することができる。Figure 7 を見ると、IQ 変調を行っていない電子ビームパルスでは、運動量 2.05 MeV/c 付近の平坦部が 1 μs 程度しかないのに対して、IQ 変調を行った場合は約 2 μs にわたって運動量が揃った部分ができていることが分かる。

### 5.2 加速後の電子ビーム評価

加速後の電子ビームを評価するために、加速管下流の分散部において、電子ビームのパルス内運動量分布の測定を行った。測定のセットアップを Fig. 8 に示す。分散部のプロファイルモニターのスクリーンには、アルミニウムミラーを使用し、電子ビームがスクリーンに入射した際に発生する遷移放射を Image Intensifier Unit (HAMAMATSU : C9016-21) 及び CCD カメラを用いて測定した。Image Intensifier Unit へは、Pulse Generator (STANFORD RESEARCH SYSTEMS : DG645) を用いてゲートパルスを印加することが可能で、ゲートがかかっている時間の光のみを測定することができる。今回の測定では、ゲートの時間幅は 100 ns に設定した。(CCD カメラの露光時間は、ビームパルス幅よりも十分長く設定した) 測定結果を Fig. 9 に示す。この測定時の分散部のプロファイルモニター位置での分散関数は  $\eta = 0.490$  m であり、ベータ関数は  $\beta_x = 0.019$  m であった。また、

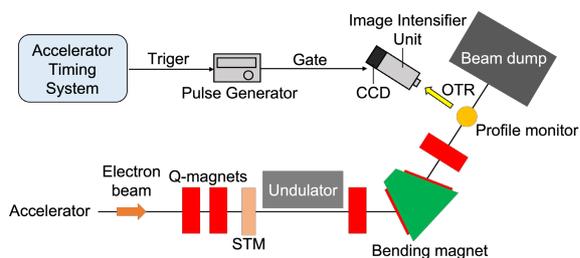


Figure 8: Measurement setup for energy profile of multi-bunch beam at dispersion section.

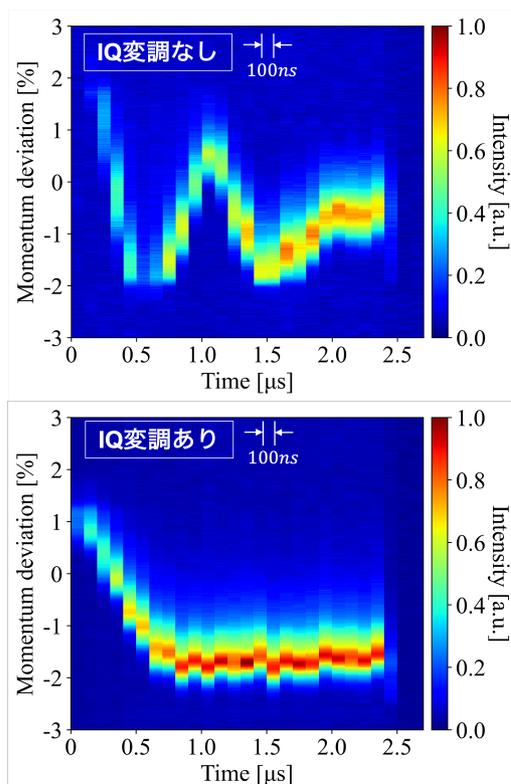


Figure 9: Measured energy profile of multi-bunch beam with and without IQ modulation after acceleration.

水平方向のエミッタンスは $\epsilon_x = 0.165 \mu\text{m}$ 、ビームのピーク電流量はIQ変調なしの場合もありの場合も共に約20 mAであった。縦軸の運動量偏差は、運動量19.8 MeV/cを基準値としている。Figure 9を見ると、最初の約800 nsのフィリングタイムを除き、IQ変調なしの場合はビームパルス内の運動量偏差が約3%であるのに対し、IQ変調ありの場合、約1%まで小さくなっていることが分かる。

## 6. まとめと今後の展望

t-ACTSにおいて、IQ変調器を用いて高周波パルスの振幅及び位相を平坦化することで、Velocity Bunchingに適した、運動量拡がりの狭い電子ビームの生成を試みた。クライストロン出口の高周波パルスの振幅位相平坦化により、振幅のパルス内変動をpeak to peakで約9.6%から約0.81%に、位相のパルス内変動を約7.9°から約0.89°まで小さくすることに成功した。

加速前の電子ビームにおいては、パルス内で運動量が一定となる時間幅を約1.2  $\mu\text{s}$ から約2  $\mu\text{s}$ にすることができた。加速後の電子ビームにおいては、約1.5にわたりパルス内運動量偏差を1%以下にすることができた。RF振幅と位相を平坦化しなかった場合に比べ、明らかにエネルギーの揃った電子ビームが加速できていることを確認することができた。

今後は、電子ビームからのコヒーレント放射の時間プロファイルを測定し、RFパルスの振幅位相平坦化を行うことにより、パルス内で様に時間幅の短い電子ビームが生成できているかを確認したいと考えている。また現在、高周波パルスの振幅位相平坦化に機械学習の導入を進めている。振幅及び位相のインパルス応答を学習させ、RFパルスの平坦化を試みている。今後は、強いテラヘルツ放射を発生できるRFパラメータの最適化を、機械学習を用いて行っていきたいと考えている。

## 参考文献

- [1] H. Hama *et al.*, Energy Procedia 9 (2011) 391-397.
- [2] S. Kashiwagi *et al.*, Energy Procedia 89 (2016) 346-352.
- [3] K. Kawase *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 679 (2012) 44-53.
- [4] L. Serafini and M. Ferrario, AIP Conf. Proc. 581, p.87-106 (2001).