

IMPROVEMENT OF THE RF LOW LEVEL SYSTEM TOWARD THE XFEL

Takashi Ohshima¹, Naoyasu Hosoda, Hirokazu Maesaka, Yuji Otake
SPRING-8 Joint-Project for XFEL/RIKEN,
1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679-222

Abstract

The construction of a XFEL 8 GeV accelerator is in progress. As for a SCSS prototype accelerator, amplification of light in undulators was confirmed in 2006, and preparation for user operation is under way. To ensure the continuous operation of the prototype accelerator, it is important to reduce the down time of the machine. So we made spare modules for key components in the low level rf system of the accelerator. In the fabrication of these modules, we tried to improve its performance toward XFEL. The modules are as follows. A new master oscillator that generates RF reference signals was made for aiming reduction of phase noise at 60 Hz apart from its carrier signal frequency (e.g. 5712 MHz). We also developed a direct IQ modulator and a direct IQ demodulator instead of a heterodyne method which is used at previous model. Direct modulation and demodulation allow us to decrease a number of local signals, which directly connects to reducing the construction cost of the XFEL. The C-band solid state amplifier was built with which enables reduction of its power consumption and improves its phase and amplitude stability, compared with the previous one. This paper describes comparison between performance with previous modules and that with newly fabricated ones.

XFELに向けた低電力高周波システムの改良

1. はじめに

理化学研究所播磨研究所においてXFEL計画が進行している。XFEL計画に先立ちその原理検証のための試験加速器が建設され、2006年には極端紫外光の増幅が確認された。現在試験加速器では極端紫外光を使ったユーザー運転開始のための準備が進められている。このことは、試験加速器での機器の故障による停止を回避しなければならないことを意味する。試験加速器の低電力高周波システム^[1]について、ユーザー実験のための加速器の運転維持のために、また、XFELで使用するさらに安定な機器の試作という位置づけも踏まえ、試験加速器で使用するいくつかの高周波機器について予備器の製作を行った。マスターオシレーターでは、商用電源に対応する周波数に位相ノイズの増加が見られていた。これに対する対策を行ったものを製作した。IQ変調器、検出器は現在ヘテロダイン方式を採用している。しかし、現在5.7GHzに対して直接ベースバンド信号を入出力できるミキサーを以下入手することが可能となっている。この部品を用いて直接IQ変調、検出するモジュールの製作を行った。この方策により、IQ変調器などのローカル信号の種類を減らすことができ、XFELの建設コストの削減に寄与できる。Cバンド半導体増幅器に関してはバイアス電圧を高周波出力の10 μ s前からパルス的に印加する方式をとったものを製作した。これにより従来器と比べ発熱量が格段に下がり消費電力を抑えることができた。以下にこれらの機器の性能についての詳細を報告する。

2. マスターオシレーター

すべての加速空洞の励振信号の基準となる信号を

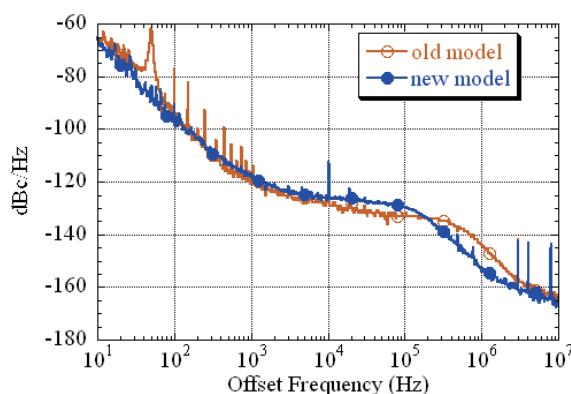


図1: マスターオシレーターの位相ノイズ。

発生させるマスターオシレーターには、低いノイズ特性が要求される。試験加速器において低位相ノイズ発振器を開発した^[2]。この発振器は5712MHzの信号を分周して2856MHz, 476MHz, 238MHzの信号を作る。また、ヘテロダイン方式のIQ変調器、検出器、BPM 処理回路で使用されるローカル信号(2380MHz, 5236MHzの信号)も供給する。5712MHz信号について1MHzのオフセット周波数でのSSB位相ノイズの大きさは-140dBc/Hz以下と優れた性能が確認されている。しかし、商用電源の周波数に対応する60Hzのオフセット周波数において、位相ノイズの増加がこの発振器において見られていた。他の周波数の信号は5712MHzを分周して作るため、レベルは下がるが同様のノイズのピークが見られていた。この原因について調査を行ったところ、AC100VをDCに変換する電源のトランスからの漏洩磁束が100MHzのOCXOに影響を与えていることが確認された。そこで、水晶発振器の位置を電源から

¹E-mail: ohshima@spring8.or.jp

遠ざけるよう筐体内での配置を見直すこと、鉄製の磁気シールドでDC電源部分を覆うことにより、この影響の低減を図った。図1に改善前後の位相ノイズの測定結果を示す。位相ノイズの測定は、アジレントE5120を用いた。60Hzの位相ノイズが-60dBc/Hzから-85dBc/Hzに低減されていることがわかる。

また、逡倍器、分周器などの部品は温度を一定に保つためにヒーターで温度制御された銅板の上に設置されている。風による振動を避けるため、強制空冷をしない予定であったが、温度上昇が大きく、結局冷却ファンを使用することとなった。今回は、部品の配置を見直し、最初からファンの使用を想定したものとした。このため、排熱の効率が向上した。

3. Cバンド直接IQ検出器・変調器

IQ検出器について、試験加速器を建設した時点においてはSバンド・Cバンドを直接ベースバンドに変換するIQミキサが市販品として存在しなかった。そこで、SバンドとCバンドの信号に対しては、中間周波数として476MHzを使用するIQ変調器、検出器を開発し試験加速器で用いられてきた。CバンドにおいてIQ検出、変調を行うためには476MHz、5236MHzの2つのローカル信号を伝送する必要があった。しかし、携帯電話などの発達により、現在では5712MHzにおいても直接IQ変調、検出できる素子を手に入れることができるようになった。そこで我々は、この素子を用いた変調器、検出器の開発を行った。直接IQ変調、検出を行うことにより、基準信号として伝送する信号の種類を減らすことができる。これは、64本のCバンドクライストロンを使用するXFELにおいては、経費の削減という観点で有利となる。

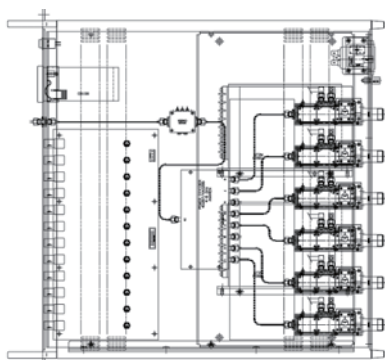


図2：新しいIQ検出器の配置図。

IQ検出器はHittite社のHMC525を用いて構成し、EIA 2幅の高さのシャーシに6チャンネルを収納した。図2にIQ検出器のレイアウトを示す。従来機では1台あたりのチャンネル数は2であったが、今回は製作したモジュールでは6チャンネルと3倍に増えている。アルミニウム製のシールドボックスに収められた6つのIQ検出ユニットはパネル背面近くに設置されている。ローカル信号は1台のRF増幅器で出力レベルを高くし、6出力の電力分配機で各IQ検出ユニットに送られる。直接変調を行うことで回路の

簡素化を進めることが可能となり、この配置が実現できた。図3にIQ検出器に5.7GHzの信号を入力したときの位相誤差を示す。入力信号の位相に対する位相誤差は1から6のチャンネルでほぼ同様の形をしていて、±2度以内である。従来機の位相変動は±1度以内であったので、この値は若干悪いと言える。

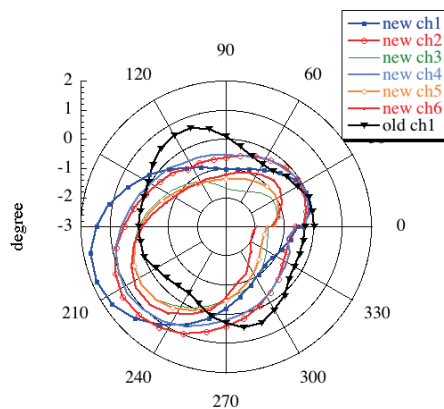


図3：IQ検出器の入力信号の位相と検出位相の間の誤差。

IQ変調器はHittite社のHMC496を用いて構成した。この素子は4~7GHzで動作し、ベースバンド信号を差動信号で入力し変調を行うものである。設定位相、振幅と実際の出力位相、振幅の測定を、ネットワークアナライザを用いて行った。振幅を一定として0度から360度まで設定位相を変えた場合、設定位相に対する出力位相のずれを図4に示す。位相誤差は±1度以内、この時の振幅変動は±3%以内であった。これも従来のヘテロダイン方式で得られていた性能(±0.5度以内)に比べると若干悪い。

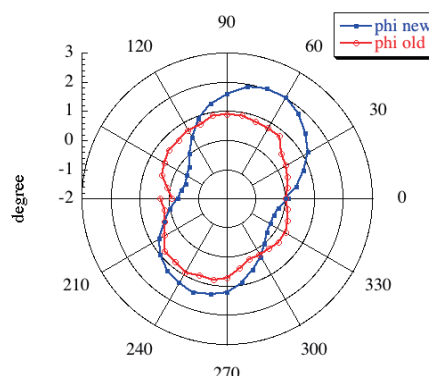


図4：IQ変調器への設定電圧で決まる位相とRF出力信号の位相の間の誤差。

上記直接IQ検出、変調器で見られている位相誤差はHMC525、HMC496の内部のIとQの軸が90.0度からずれていること、IQの強度バランスのずれから生じていると思われる。8 GeV器に適用する際には、さ

らに精度の向上を目指してIとQの分離度の高いミキサーの使用、または、IQ用の個々のベースバンドアンプの利得・オフセットバランスの向上、ソフトウェアによる軸ずれの補正などの対策を検討している。

4. Cバンド半導体増幅器

Cバンドの半導体増幅器は、試験加速器の予備器として、アンプのバイアス電圧をパルス的に印加する方式を用いたものを開発した。この方式を採用することにより、トランジスタでの発熱を大幅に低減できた。また、4つのトランジスタモジュールで構成されている増幅器のサイズもコンパクトにすることができた。

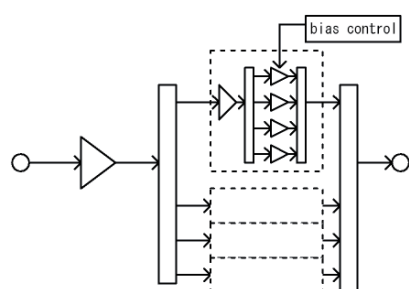


図5：パルス増幅器構成図。

RFパルス波形内の位相変動についての測定結果を図6 a)に示す。変動は1.2度以内に収まっている。パルス波形の10%-90%の立ち上がり時間は34ns以下、たち下りは23ns以下であった。パルス内の振幅平坦度についての測定結果を図6 b)に示す。振幅の平坦度は±1%以内に収まっている。

RFパルス出力電力は1mWの入力に対して500W以上の出力が得られている。8時間連続運転での位相変動、振幅変動の測定の結果を図7に示す。位相変動

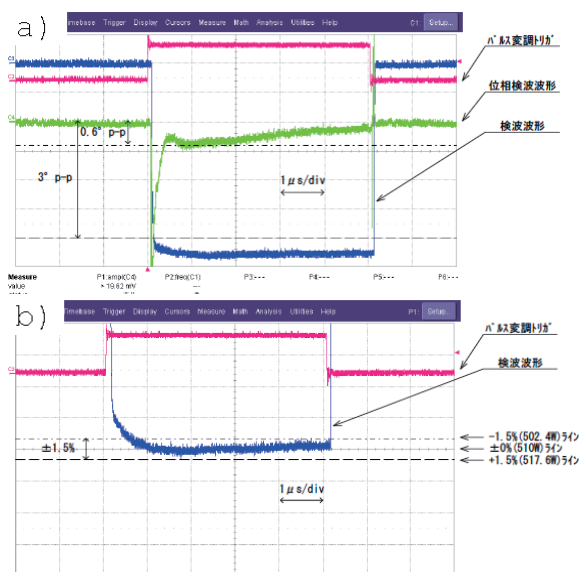


図6：Cバンド半導体増幅器のパルス特性
a)位相特性、b)パルス内振幅平坦度特性。

は1度以内、振幅変動は1%以内に収まっている事が確認された。このCバンド半導体増幅器は現在試験加速器で実際に使用されており、安定な動作が確認されている。

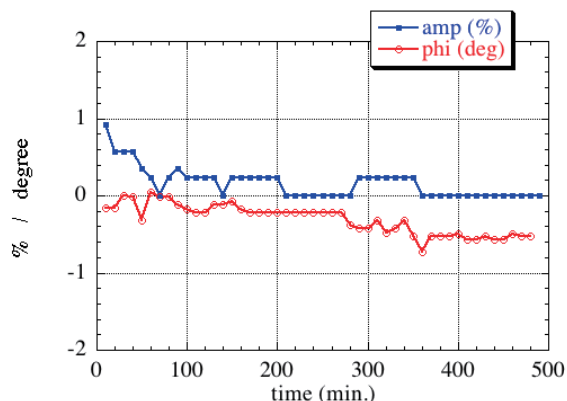


図7：Cバンド半導体増幅器の8時間での振幅、位相の変化。

5. まとめ

SCSS試験加速器の定常運転のために、鍵となる高周波機器の予備器の製作が必要であった。この理由から、予備器として低ノイズ化マスターオシレータの製作、改良型Cバンド半導体増幅器の製作、ヘテロダイン方式ではない直接IQ変調器、検出器の製作を行った。それぞれの機器は、我々の要求するXFELに向けた性能を満足し、試験加速器で使用または使用される予定である。これによって機器の故障による長期の運転停止を回避して、試験加速器の安定した定常運転の維持に期待が持てる。

6. 謝辞

今回開発した機器の製作に協力していただいたキャンドックスシステムズの埜下英児氏、三菱電機特機の方々に感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] T. Ohshima, et al., "SCSS試験加速器のRFローレベルシステム" Proceedings of the 3rd Particle accelerator Society of Japan, Sendai, Linear Accelerator Meeting in Japan, Aug. 2-4, 2006
- [2] Y. Otake et al., "Sub-pico-second trigger system for the SCSS prototype accelerator", Proc. of the 26th International Free Electron Laser Conference, 2006.