

COMPENSATION OF THE RF PHASE DRIFT FOR AN RF SIGNAL DISTRIBUTION CABLE

Ryoji Nagai¹, Masaru Sawamura, Ryoichi Hajima, Nobuyuki Nishimori, Nobuhiro Kikuzawa, Hokuto Iijima
Energy Recovery Linac Development Group, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

Abstract

To ensure high-quality beam acceleration, the phase drift of the acceleration RF signal has to be suppressed. When the RF signal is distributed with the cable, the phase drift exists due to the change of the electrical length of the cable. The phase drift has been suppressed by keeping constant the temperature and the atmospheric pressure of the cable. A phase drift compensation system using optical fibre has been employed for a large accelerator because the phase drift suppression of the cable is insufficient. However, the RF distribution system using optical fibre is complex and not suitable in the medium scale accelerator. A method of passively stabilizing the distributed RF phase is proposed in this study. In the result of the error evaluation due to characteristics of actual RF elements, the RF signal is distributed by the proposed system with rms phase error of 0.1 degrees or less in the accelerator of length of 500 m.

高周波分配ケーブルの位相変動補償

1. はじめに

RF線型加速器では各加速空洞の位相同期を取る必要があり、通常は同軸ケーブルなどで基準となるRF信号を各加速空洞のRF制御系に分配している。ケーブルでRFを分配するシステムではケーブルの電気長が温度、気圧などの周辺環境で変動するために位相が変動してしまう^[1,2]が、高品位ビームの加速を行うにはこの変動を十分に小さくする必要がある。これまでの加速器では、ケーブル(同軸管)の温度、気圧を一定に保つことで変動が抑えられてきた^[3]。さらに、大型加速器ではこの方法での電気長の安定化のみでは不十分であり、光ファイバを用いた補償システムが採用されている^[4]。

ERL放射光源は次世代の放射光施設として注目されており、KEK、JAEA、ISSPなどでは共同でこのための実証器の設計・建設を進めている^[5]。ERL放射光源の大きな特徴として、超低エミッタンス電子ビームによるコヒーレントな光の発生、フェムト秒の超短パルス放射光の発生がある。超低エミッタンスを保持したまま、電子ビームを加速するためには、加速空洞間の位相同期はこれまで以上に重要になる。また、フェムト秒光源を利用した実験では同期システムが実験の鍵を握る。そこで、このような位相同期システムを実現するためのRF信号分配システムが必要になる。しかし、ERLの全長はせいぜい500m程度であり、光ファイバを用いたRF分配システムは複雑で効率的ではない。そこで、RF信号だけで受動的にケーブル電気長の安定化を行う方法について提案し、このシステムの誤差要因について検討し全長500mの加速器でどの程度の位相誤差を保障できるかを検討した。

2. 位相補償の原理

図1のようなn個のRF-StationでのRF信号分配をするとし、上り・下り双方向に分配したいRF信号の周波数の半分の周波数でRF信号を流す。各RF-Stationではそれぞれの方向の信号を方向性結合器で取り出し、ミキサーで混合してアップコンバートして分配したいRF信号を得る。

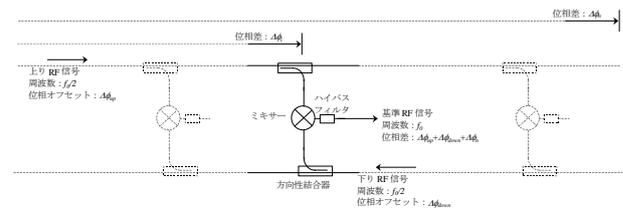


図1. 位相補償の原理図

この時、上り・下りそれぞれのスタート位置での位相のオフセットを $\Delta\phi_{up}$ 、 $\Delta\phi_{down}$ 、 i 番目のRF-Stationまでの位相差を $\Delta\phi_i$ とすると、 i 番目のRF-Stationでの上り信号の位相は $\Delta\phi_{up} + \Delta\phi_i$ 、下り信号の位相は $\Delta\phi_{down} + (\Delta\phi_i - \Delta\phi_i)$ となるのでミキサーから出力される信号の位相は $\Delta\phi_{up} + \Delta\phi_{down} + \Delta\phi_i$ となる。同様に、 j 番目でもミキサーから出力される基準信号の位相は $\Delta\phi_{up} + \Delta\phi_{down} + \Delta\phi_i$ となる。即ち、すべてのRF-Stationでのミキサーから出力される信号の位相は $\Delta\phi_{up} + \Delta\phi_{down} + \Delta\phi_i$ となるので、電気長が変動して $\Delta\phi_i$ が変化してもRF-Stationどうしの位相差には変動を生じないようになる。また、発振器の温度ドリフト等で $\Delta\phi_{up}$ 、 $\Delta\phi_{down}$ が変動しても、全てのRF-Stationの位相が同じように動くのでRF-Station間の位相差に

¹ E-mail: nagai.ryoji@jaea.go.jp

は影響がない。

3. 実際の補償回路

最初に考えられる実際の回路として、図2のように2本のケーブルの両端に発振器を設置し、その信号をケーブル端で整合終端するというものである。ただし、この場合には、2本のケーブル間で環境による電気長の変動が起こらないように同じ箇所に同じ条件で設置する必要がある。この回路構成ではケーブルごとの環境に対する変化率の個体差により位相誤差を生じるので個体差の少ないケーブルであることが望ましい。

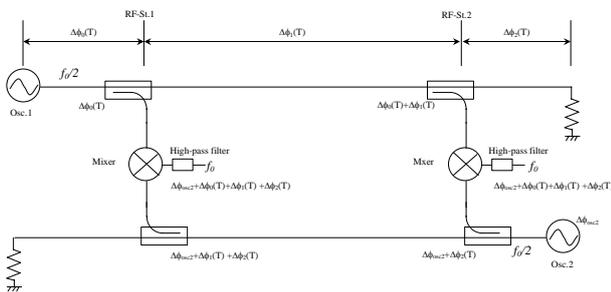


図2. 実際の回路構成、Case-1

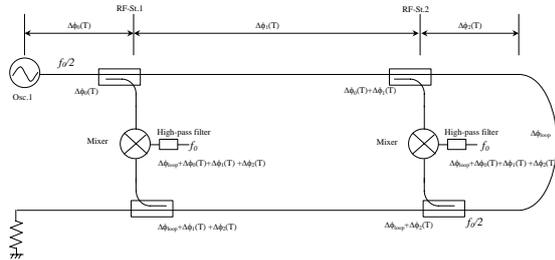


図3. 実際の回路構成、Case-2

次に、図2のふたつの発振器間での位相差は各RF-Station間の位相差に影響を与えないので、図3のようにケーブルを1本にして折り返し、発振器を1台にした回路が考えられる。この場合も同じ位置を通るケーブルの折返し部分での電気長の変化率の差があると位相誤差を生じる。

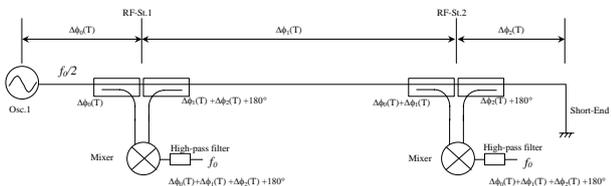


図4. 実際の回路構成、Case-3

そして、図4のように1本のケーブルで終端を短絡かまたは開放することで、RF信号を全反射させ、1本のケーブル上の進行、反射信号により補償回路を実現する回路が考えられる。このようにすると、ケーブルの特定の部分による電気長変化率の差があったとしても、位相変動が同様に加算されるので、各RF-Station間で位相変動を生じることはない。しかし、この回路では後述の方向性結合器による位相

誤差を生じるので、どの回路構成がもっとも優れているかは実際のケーブルで実証試験をする必要がある。

4. RF素子による誤差

4.1 方向性結合器による誤差

方向性結合器はRF信号の進行波（または反射波）の一部を取り出す素子であるが、実際には図5にあるように反射波（進行波）の一部が混ざってしまう。この割合を方向性という。このために、方向性結合器から出力されるRF信号の位相は純粋に進行波のみによる位相ではないので、電気長の補償が充分に出来なくなる可能性がある。

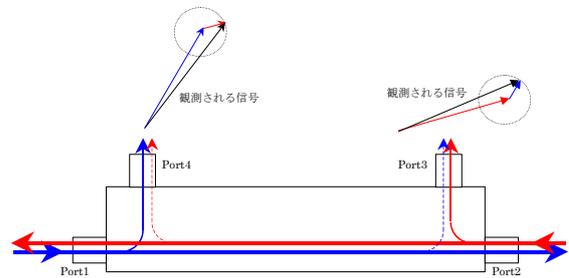


図5. 方向性結合器の方向性

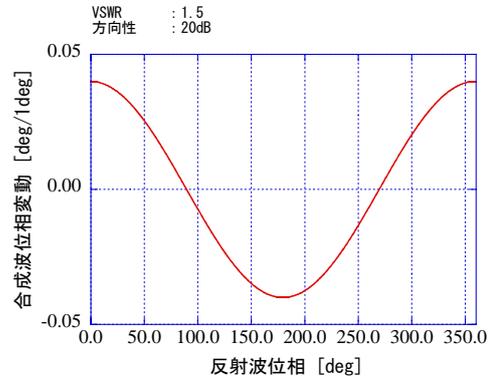


図6. 反射波の位相に対する補償回路の位相変動 (Case-1、Case-2について)

まず、Case-1およびCase-2について考える。これらの回路では完全に整合が取れていれば、反射波は生じないので、方向性結合器による誤差は生じないが、実際は回路素子やケーブルの僅かな不整合のために反射波が生じる。VSWRが1.5、方向性結合器の方向性が20dB、上り信号と下り信号の位相差180度の場合に、進行波に対する反射波の位相に対して、ケーブル上のRF信号の位相が1度変動した時にミキサーで合成された（補償回路の）RF信号の位相変動の様子をプロットしたものが図6である。この図からCase-1およびCase-2の回路で、VSWR1.5、方向性20dBの場合には、ケーブルだけで半分の周波数のRF信号を分配した際に位相が1度変化するような電気長の変動があったとしても、この補償回路により位相変動を少なくとも0.04度以下に抑えられること

が分かる。また、補償回路での位相変動は反射波の位相により変化するので、RF-Station間のケーブルの長さを反射波の位相が90度または270度付近なるように選ぶことで、更に位相変動を補償出来ることが分かる。

次にCase-3の補償回路について考える。この場合は1本のケーブルで補償回路を構成しているので、方向結合器での進行波と反射波の位相関係が対称であるために、ケーブルに損失がなければ方向性結合器の方向性の影響は受けないが、実際のケーブルでは損失があるので、方向性の影響を受けてしまう。そこで、損失10dB、方向性30dBの場合の進行波に対する反射波の位相に対して、ケーブル上のRF信号の位相が1度変動した時にミキサーで合成された（補償回路の）RF信号の位相変動の様子をプロットすると図7のようになる。この場合には最大0.1度程度の変動があり、ケーブルだけの場合に比べて10分の1程度までしか補償されない。従って、Case-3の場合には、補償回路を十分に機能させるには各RF-Station間のケーブルの長さを進行波と反射波の位相差が90度または270度付近になるように注意深く合わせる必要がある。

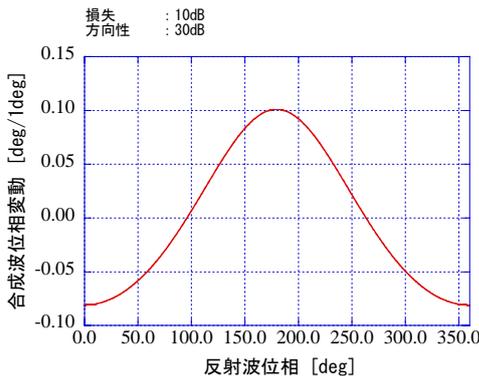


図7. 反射波の位相に対する補償回路の位相変動 (Case-3について)

図8は方向性が20dB、30dB、40dB、進行波と反射波の位相差180度の場合の損失の変化による位相補償の様子である。方向性20dBで損失が15dB程度以上ではケーブルだけの場合より変動が大きくなってしまう場合があることが分かる。方向性は30dB程度、損失は10dB程度以下であることが望ましいことが分かる。

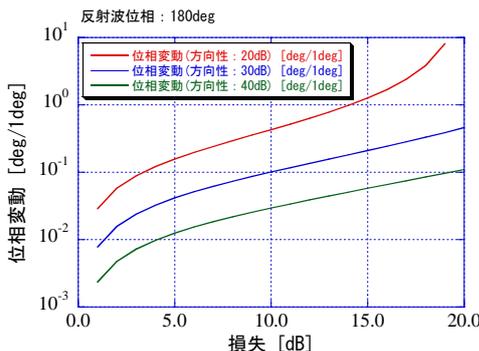


図8. 損失の変化による位相補償の変動

4.2 ミキサーによる誤差

ミキサーにはギルバートセルのようなアナログ乗算器とDBMのような半導体素子の非線型性を利用したものがあ。原理的にはアナログ乗算器では乗算成分（位相の和成分）のみであるが、DBMでは各入力2倍波成分も出力されるので、ミキサーとしてはアナログ乗算器を用いるのが望ましい。さらにDBMでは温度による影響も受けるので温調を施す必要がある。アナログ乗算器でも実際には2倍波成分などが出力され、ミキサーの影響は実際の素子、回路によるので、詳細は補償回路のテストベンチで検証する必要がある。

4. 実際の加速器での位相誤差の見積もり

5GeVのERLについてCase-3でRF分配システムを構築するとする。各空洞の加速勾配を20MV/mとし、1台のクライオスタットに8空洞収めるとすると全体で32クライオスタットになり、全長は約350mとなる。この間に16箇所のRF-Stationを設けるとする。CEBAFでの実績では750ftのケーブルで2.9deg-rmsを1427MHzで達成できているので、650MHz、350mでは2.02deg-rmsが達成できる。ケーブルにHelix HJ11-50を用いると損失は1.09dB/100mで、RF-Stationの挿入損失を0.2dBとすると全体の損失は約7dBとなるので方向性30dBの方向性結合器を用いたとすると合成前のRFの位相変動に対する合成したRFの位相変動は最大で0.06deg/1degであるので、0.12deg-rmsの位相精度でのRF分配が可能となる。さらにRF-Station間の電気長の最適化を考慮すれば、500m程度の加速器であれば、0.1deg以下の位相精度のRF分配が可能といえる。

5. まとめ

ケーブルでRFを分配するシステムにおいて受動的に電気長変動の影響を補償する方法を提案し、実際のRF素子による誤差についても検討したところ、加速器全長が500m程度であれば0.1deg程度以下の位相誤差でRFを分配できることが分かった。詳細は今後テストベンチを用いて検証していく予定である。

参考文献

- [1] 永井良治、他、第28回リニアック技術研究会報文集 (2003) 315-317.
- [2] 永井良治、他、第14回加速器科学研究発表会報告集 (2003) 362-364.
- [3] A. Krycuk, et al., Proc. of PAC 1991 (1991) 1470-1472.
- [4] T. Kobayashi, et al., Proc. of LINAC 2004 (2004) 727-729.
- [5] 羽島良一、他、KEK Report2007-7.