

リニアコライダー用Sバンド離調型加速管の研究

松田 美和^{1,A)}、栗木 雅夫^{B)}、早野 仁司^{B)}

A) 横浜国立大学大学院 工学府物理情報工学専攻物理工学コース

〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5

B) 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大徳1-1

概要

リニアコライダーではプレライナックにSバンド加速管の使用が予定されており、エミッタンス増大を抑制したSバンド加速管の開発が求められている。Sバンド離調型加速管ではエミッタンス増大の原因となる二重極モードの周波数をセル毎に意図的にずらすことで実質的にウェーク場を抑制する。問題点はウェーク場の大きさが周波数に対し敏感であるということである。そこで周波数誤差に対するウェーク場の影響をシミュレーションによって評価した。また、設計の基礎資料を取得するためテスト用加速管を製作し、加速モードおよび二重極モードの共振周波数の測定をした。今回はこれらの事について報告する。

1. はじめに

高エネルギー素粒子物理学の次期計画であるリニアコライダー (GLC) のメインライナックにはXバンド (11.4GHz) 加速管が使用される予定である。プレライナックではビーム長がまだ長く、その加速のためには波長の長いSバンド (2.8GHz) の加速管が使用される予定である。プレライナックでは、ダンピングリングからの高品質ビームをエミッタンス増大させることなくメインライナックの入射エネルギーまで加速しなければならない。そのためエミッタンス増大を大幅に抑制するSバンド加速管の開発が必要である [1]。

エミッタンス増大の原因はビームが引き起こす二重極モードのウェーク場であり、その影響を抑制する加速管を開発する事が重要である。その方法のひとつとして各加速管セルの二重極モードの周波数を意図的に制御 (離調) し打ち消しあう効果によりウェーク場を抑制する離調型加速管がある。Xバンド加速管で開発されている離調技術は後述するようにそのままではSバンドでは応用が難しいので新しい離調技術を開発する必要がある。さらにその周波数制御は従来のSバンド加速管製作で用いられてきた工作精度で十分なのか明らかではない。

2. 加速管におけるウェーク場

加速管の中心軸 (z軸) から r_q だけ離れた位置を通過する電荷 q の誘起する半径方向ウェーク場 W_m は

$$W_m = 2m \frac{l_n c}{\beta_n a} \frac{r}{a} \frac{r_q}{a} \sin \beta_n (t - z/c) \quad (1)$$

と記述できる。ここで m は回転方向の次数、 n はモードを表す次数、 l_n は loss parameter、 β_n は角振動数、 a は加速管のアイリス半径を表す。(1) より二重極モードの半径方向ウェーク場は $m=1$ のときであるから、

$$W_m = 2qr_q k_n \sin \beta_n (t - z/c) \quad (2)$$

と表される。ここで k_n は kick factor でシャントインピーダンス R と Q 値を用いて

$$k_n = \frac{E_z^2 c}{4\beta_n W_n a^2} = \frac{R}{Q} \frac{c}{4a^2} \quad (3)$$

と与えられる。

3. 離調型加速管

各加速管セルの加速モードの周波数を保ちながらアイリス半径を意図的にずらすことにより各セルで生じる二重極モードの周波数を制御し互いに打ち消し合うよう設計された加速管を離調型加速管と呼ぶ。

Xバンド離調型加速管では各セルで生じる二重極モードの周波数がガウス分布となるよう設計されている。図3-1はその加速管内において、ウェーク場の発生源より遅れて通過するビームが感じるウェーク場を示している。ウェーク場の早い減衰が見込まれるが、現実には不完全なガウス分布によるウェーク場の再上昇が生じ、その効果はセル数の少ないSバンド加速管ではより深刻となる。そこで、各セルで生じる二重極モードの周波数を線形分布となるよう各加速セルの設計を試みた。図3-2はその場合のウェーク場を表している。ガウス分布ほど早い減衰は見込めないがウェーク場の再上昇は深刻ではなくなる。減衰の不十分なすぐ後ろのバンチ群に関しては、図3-3に示すように二重極モードのゼロクロスバンチ間隔 (1.4ns) に合わせ込む事により実質的

¹ E-mail: mmiwa@post.kek.jp

に低下させる。

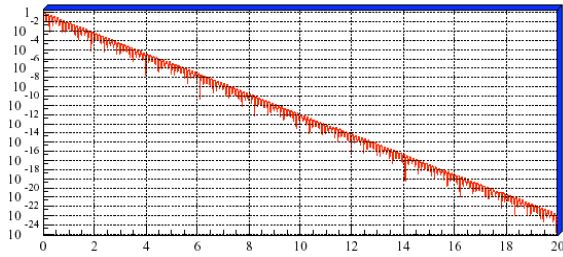


図3-1 二重極モードをガウス分布させた場合の横方向ウェーク場

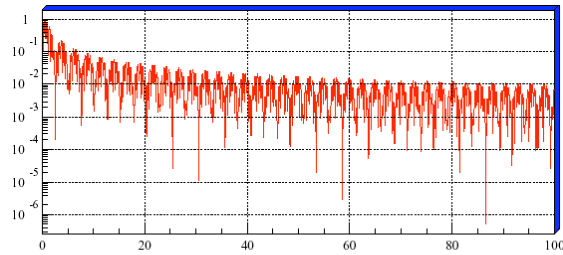


図3-2 二重極モードを線形分布させた場合の横方向ウェーク場

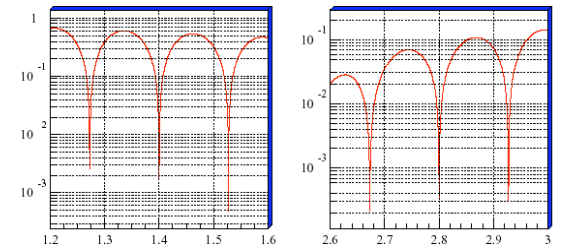


図3-3 図3-2の1.4ns、2.8ns付近のウェーク場

図3-4は、 $t=0$ でウェーク場が発生し、それより遅れて通過するビームが感じるウェーク場のシミュレーション結果である。二重極モードの周波数が線形分布となるよう加速管のアイリス半径を15.4～18.0mmまで変化させている。図中の黒点は1.4ns間隔に存在する各バンチの感じるウェーク場を表している。この時各セルの寄与はセル間カップリングを仮定せず、式(4)を用いて各加速セルに生じる二重極ウェーク場を足し合わせた。

$$W_t = \sum_{n=1}^{N_c} 2 \frac{k_n}{N_c} \sin(2\pi f_n t) \quad (4)$$

ここで N_c はセルの数、 k_n と f_n はMAFIAを用いて求めた n 番目のセルのkick factorと二重極モードの周波数である。

GLCにおいてエミッタンス増大を無視できる程度に抑えるにはウェーク場を0.035MV/(m²nC)程度以下にする必要がある[2]。図3-4より50ns以降についてはウェーク場のenvelopeがその要求を満たしている事が分かる。50nsまでの領域では各バンチが実質的に感じるウェーク場は十分低くなっている。図3-5

には1.4nsおよび11.2ns付近でのウェークの様子が示されている。

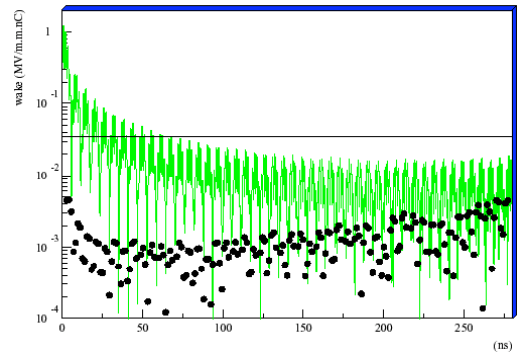


図3-4 MAFIAシミュレーションによる加速管全体のウェーク場。黒点は各バンチの位置を表している。

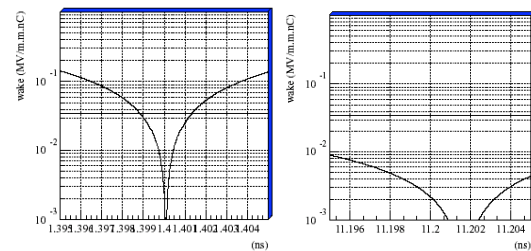


図3-5 1.4ns、11.2ns付近のウェーク場

4. 誤差の影響

図3-4は理想的な加速管の場合であり、実際は加工誤差や温度変化などに対しウェーク場は変化を受ける。

誤差によるウェーク場への影響としてここでは2つを仮定した。一つは温度変化などによって共振周波数に系統的誤差が存在した場合のウェーク場への影響であり、もう一つは加工誤差などの共振周波数にランダムに誤差が存在した場合の平均のウェーク場への影響である。

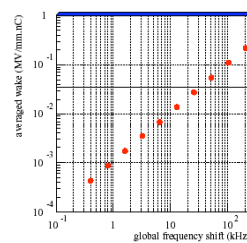


図4-1 周波数の系統的な誤差に対する平均のウェーク場の変化

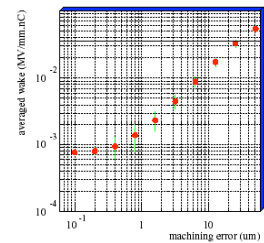


図4-2 加工誤差に対する平均のウェーク場の変化

図4-1は横軸に周波数の系統的な誤差をとり、バンチの感じるウェーク場の平均値を示したものである。系統誤差が25kHzを超えると平均ウェーク場が0.035MV/(m²nC)を上回っており、これから周波数の

系統的な誤差は25kHz以下にしなければならないことがわかる。これは温度にして0.39Kに相当する。一方、図4-2はランダムな加工誤差に対する平均ウェーク場の変化である。これによると加工誤差は12 μ m以下に抑える必要がある。Xバンド離調型加速管の高精度な加工技術を応用すれば十分可能である。

5. テスト加速管セル

実際の加速管での共振周波数はシミュレーションによる共振周波数とは一致しない。従って周波数制御に厳しい制限を持つSバンド離調型加速管を設計するには実際の共振周波数をもとに行わなければならない。そのためにテスト用加速管セルを製作し、ネットワークアナライザを用いた測定を行う事とした。実際の加速モード共振周波数を設計値に合わせた上で二重極モード共振周波数を測定する。

作成したテスト加速管は3種 (TYPE A、B、C) あり、本加速管のようにアイリスの大きいセルにおいてシャントインピーダンスの高いPhase advance $3/4\pi$ のDisk loaded型とした。各タイプ加速モードおよび第1、第2二重極モードの1セル当たりのPhase advanceに対する共振周波数は図5-1となるよう表5-1のように設計した。実際に製作された各セルのサイズは表5-2の通りであった。

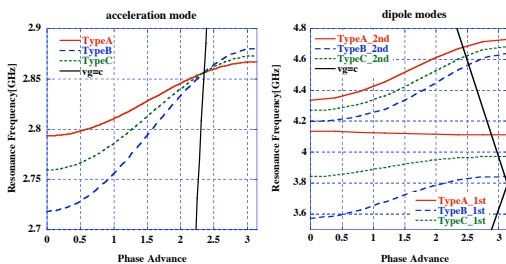
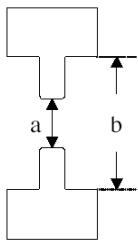


図5-1 各タイプ加速モード (左図) および第1、第2二重極モード (右図) の1セル当たりのPhase advanceに対する共振周波数



	a [mm]	b [mm]
TYPE A	28.000	84.170
TYPE B	36.000	87.070
TYPE C	32.000	85.506

表5-1 a、b値の設計値

	a [mm]	b [mm]
TYPE A	27.982	84.170
TYPE B	35.985	87.068
TYPE C	31.996	85.506

表5-2 a、b値の実測値

テスト管セルを8セル並べ、両端には加速モードおよび二重極モードの測定のためにそれぞれアイリス中心とアイリス中心から半径方向に15mmずれた位

置にアンテナポートを作った。測定には1、2、3mmのアンテナを用いてアンテナ長をゼロに外挿した共振周波数を求めた。さらに30 $^{\circ}$ C真空中における共振周波数へ換算した。

図5-2は、各テスト加速管の加速モードの共振周波数の設計値に対する測定値の差である。実際の測定値は $3/4\pi$ のPhase advanceでは数百kHzほど低いことがわかる。表5-3は各セルのa部およびb部を10 μ m削ったときの $3/4\pi$ における加速モード周波数のずれをシミュレーションによって求めた値である。図5-2および表5-3より、Phase advance $3/4\pi$ の加速モード共振周波数を設計値に合わせ込むためにはTYPE A、B、Cのa部をそれぞれ29 μ m、9 μ m、11 μ m削るべきであることがわかった。

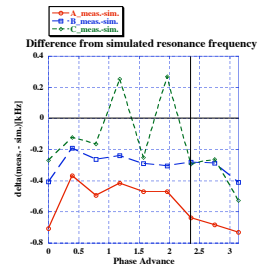


図5-2 共振周波数の設計値に対する測定値の差

	df/da [kHz]	df/db [kHz]
TYPE A	220.0	-758.0
TYPE B	303.0	-758.0
TYPE C	257.0	-758.0

表5-3 各セルのa部およびb部を10 μ m削ったときの共振周波数のずれ(シミュレーション値)

6. まとめと今後の予定

Sバンド離調型加速管の開発は次世代リニアコライダにとって必要不可欠である。しかしその離調技術は周波数制御に厳しい制限をおくため簡単ではないことがわかった。よって今回、設計の基礎資料を取得するため8セルテスト加速管セルを設計、製作し、加速モードおよび二重極モードの共振周波数の測定を行った。

今回の測定で加速モードの共振周波数を設計値に合わせ込むために必要なa部の削除分がわかった。今後、加速モードが設計値になるよう再加工したテスト加速管セルの二重極モードの共振周波数の測定を行い、それをもとに加速管の仕様を決定していく。

参考文献

- [1] K.L.F.Bane,Z.Li, "DIPOLE MODE DETUNING IN THE NLC INJECTOR LINACS", SLAC, Aug.19, 2000
- [2]奥木敏行氏の計算による