

DETUNED STRUCTURE (II)

*¹M.YAMAMOTO, *²T.TANIUCHI, K.KUBO, T.HIGO and K.TAKATA

*¹The Graduate University for Advanced Studies

*²Tohoku University

National Laboratory for High Energy Physics

Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan

Abstract

To suppress an emittance growth through the X-band linac in the multi bunch operation for the Japan Linear Collider, the long range transverse wake field must be damped below 1% at the next bunch compared with the amount excited by the preceding bunch. In this paper the wake field in detuned structure was calculated by using equivalent circuit model. It was found that the wake field can well be damped by distributing the frequencies of the lowest dipole mode within more than 150 cells in a structure.

周波数分散構造(II)

1.はじめに

Japan Linear Collider (JLC)^[1]では、ルミノシティを増加させるためにマルチバンチ運転が計画されている。この場合、long range transverse wake fieldによるエミッタンス増加が問題となってくる。このエミッタンス増加から生じるルミノシティの低下を許容値内に収めるためには、次のバンチが到着する前にwake fieldを1%程度まで緩和させなくてはならない。そのために我々は、wake fieldを加速管の外に出すことにより減衰させる構造や、その影響をキャンセルさせる構造について検討を行なっている。前者はdamped structure^[2]後者はdetuned structure^[3]と呼ばれ、本論文では後者のみを取り扱う。

Detuned structureは、減衰させたいwake fieldのモード(例えば、TM110-like)の周波数を加速セル毎に適当に変える。そうすると、同じ様な電磁場分布ではあるが、周波数が異なる多数のモードが存在するようになる。次のバンチ(1.4nsec後)以降では、その周波数差は位相差として感じられ、これを $2\pi[\text{rad}]$ に分布させることが出来れば、そのモードの実効的なwake fieldを非常に小さくすることが出来る。

wake fieldを計算する場合、通常'TBCI'^[4]のようなコードが使用される。しかし、 μm オーダで形状が変化する加速セルが100個程度連なったdetuned structureの場合、形状を表現するメッシュやCPU Time・メモリー等の制限から、そのようなコードでのwake fieldの計算は不可能である。しかしながら、主にwake fieldは少数のモードから構成されていると考えることが出来る^[5]ので、'TBCI'とは異なる方法、即ちモード毎の取り扱いが可能である。モード毎の電磁場は'URMEL'^[6]のような共振モードを解くようなコードで計算し、そしてその振る舞いはそれを表現する等価回路モデルの様なものでも計算することができる。

long range wake fieldの中で特に問題となる最もロスパラメーターの大きいモードは、最も周波数の低いダイポールモード(1st dipole mode)である。このモードは、TM110-likeとTE111-likeが混在したような電磁場分布をしており、このことを考慮にいれた等価回路モデルを用いて、このtransverse wake fieldを計算したので報告する。

2.等価回路モデル

まずはじめに、1st dipole modeの特徴を得るために電磁場分布と分散関係を'URMEL'を用いて計算した。この計算では、加速モードの周波数を維持したまま、ディスクの半径 $a[\text{mm}]$ を変化させた。この計算から、

1st dipole mode の0モードの電磁場分布は、ディスクの穴径 $a=3.9[\text{mm}]$ 付近でTM110-likeからTE111-likeに変わることが分かった(Fig.1)。他方、 π モードの電磁場分布は、常にTM110-likeであった。このことから、1st dipole modeはTM110-likeとTE111-likeの間の干渉がある事が分かり、このモードの振る舞いを等価回路モデルで記述する場合、この干渉を含んだ取り扱いが必要である。

Fig.2のような等価回路が、モード間の干渉を含んだモデル(double chain of coupled circuit)^[7,8]として使用されている。この等価回路の上方はTM110-likeを下方はTE111-likeを示す。この等価回路は2つのパスバンドを含んでおり、それぞれ1st dipole mode, 2nd dipole mode に対応する。モード間の干渉を含んだ等価回路とそれを含まない等価回路(single chain of coupled circuit)^[9,10,11]の分散関係をそれぞれと'URMEL'と比べ、結果をFig.1に示す。このグラフより、モード間の干渉を含んだ等価回路の方がよい近似であることが解かる。さらにモード間の干渉を含んだ等価回路では、モード間(TM110とTE111)のミキシングの割合まで解かり、電磁場分布をより正確に表すことが出来る。

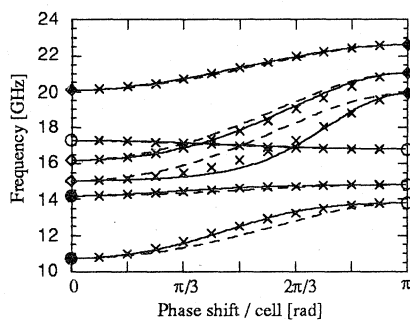


Fig.1 分散関係

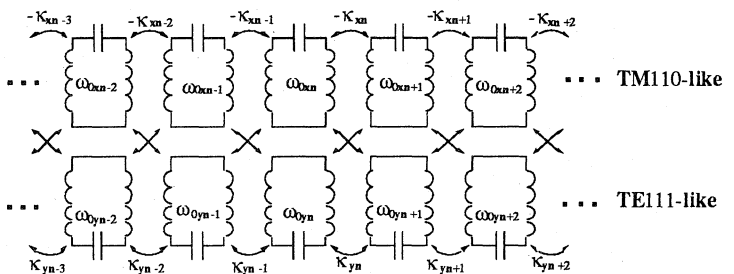


Fig.2 Double chain of coupled circuit

実線はdouble chain of coupled circuitを、破線はsingle chain of coupled circuitを表す。丸、クロス、ダイヤモンドはURMELの結果を表し、白抜きはTM110塗りつぶしはTE111を表す。

このdouble chain of coupled circuitモデルは、(1)式^[7,8]で表すことが出来る。ここで、 $(X_n, \omega_{0xn}, K_{xn})$ と $(Y_n, \omega_{0yn}, K_{yn})$ は、それぞれTM110-likeとTE111-likeモードのn番目の加速セルに相当する回路の電流とカップリングが無い時の共振周波数とカップリングを表す。この共振周波数とカップリングは、1つの加速セルを'URMEL'を用いて計算することにより求めることが出来る。(1)式から求められる固有値とそれに対する固有ベクトルは、加速管の共振周波数とTM110-like及びTE111-likeの電磁場分布の強度を表す。この電磁場分布からロスパラメーター (あるいはR/Q) を求め、それを足し合わせるにより1st dipole modeと2nd dipole modeのwake fieldは計算できる。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 X_n}{dt^2} + \omega_{0xn}^2 X_n - \frac{K_{xn} d^2 X_{n+1}}{2 dt^2} - \frac{K_{xn-1} d^2 X_{n-1}}{2 dt^2} + \frac{\sqrt{K_{xn} K_{yn}} d^2 Y_{n-1}}{2 dt^2} - \frac{\sqrt{K_{xn+1} K_{yn}} d^2 Y_{n+1}}{2 dt^2} &= 0 \\ \frac{d^2 Y_n}{dt^2} + \omega_{0yn}^2 Y_n + \frac{K_{yn} d^2 Y_{n+1}}{2 dt^2} + \frac{K_{yn-1} d^2 Y_{n-1}}{2 dt^2} - \frac{\sqrt{K_{xn} K_{yn}} d^2 X_{n-1}}{2 dt^2} + \frac{\sqrt{K_{xn+1} K_{yn}} d^2 X_{n+1}}{2 dt^2} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

3 ウェークフィールドの計算結果

先に示したdouble chain of coupled circuitを用いて、detuned structureのwake fieldの計算を行なった。このdetuned structureの周波数分布は、1st dipole modeの中でビームと位相速度の等しいモード(phase shift / cell)の周波数がガウス分布(中心周波数が $f_0=15.6[\text{GHz}]$ 、 $\sigma=0.35[\text{GHz}]$ 、全幅 $\Delta f=1.95[\text{GHz}]$ で両端をカット)になるようにした(Fig.3)(NLCのパラメーターに近い)^[7,8,9,10]。このような分布を作るため実際の加速管では、ディスクの径aをFig.4のようにセル毎(ディスクの厚さは $2[\text{mm}]$ 一定、150個の加速セル)変えればよい。このFig.4の分布の

場合、(ディスクの径 a の-3.5乗に比例する) single bunch wake field の実効的影響は、 $\langle a^{-3.5} \rangle^{-1/\beta^5} = 0.16\lambda$ となり許容値以内である。

このような detuned structure のロスパラメーターと long range transverse wake field は、Fig.5,6 のようになる。次のバンチから、最後のバンチにわたって 1% 程度に wake field が減衰していることが分かる。

実際の加速管では製作誤差等から仮定した分布にエラーが生じ、それが原因となって wake field のキャンセルの効果が減少することがありうる。そこで、加速モードの製作精度の目標値 1×10^{-5} に比較して十分大きいエラーがある場合について計算を行なった。1st dipole mode に $\sigma = 1 \times 10^{-4}$ 最大 3σ のガウス分布状のエラーがある場合、wake field は Fig.7 のようになる。この程度のエラーがある場合でも wake field は 1% 程度に減衰して、detuned structure は実現可能である。

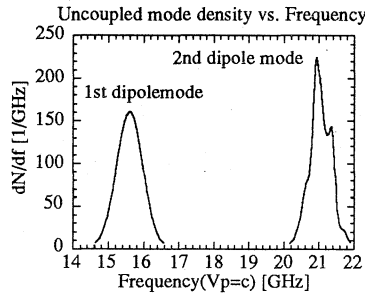


Fig.3 周波数分布

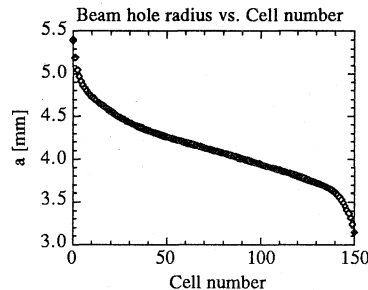


Fig.4 ディスクの穴径 a

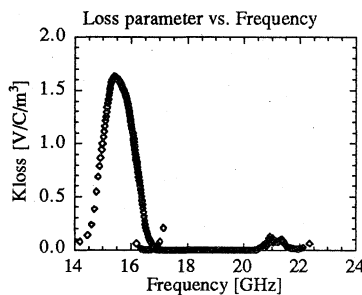


Fig.5 ロスパラメーター

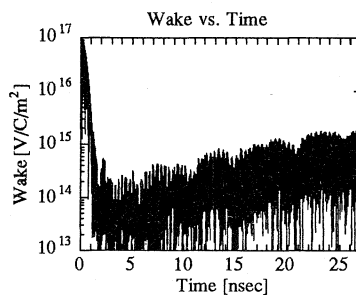


Fig.6 Wake field

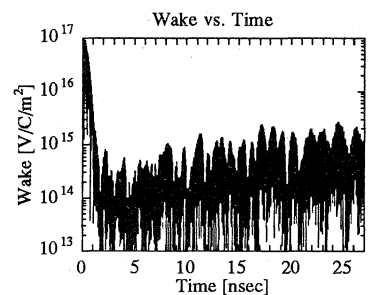


Fig.7 エラーがあるときの wake field

5 まとめ

カップラー部の効果は含まれていないが、今回の計算から、もっとも強い long-range transverse wake field は十分に減衰できる見通しがついた。今後は、カップラーの効果を取り入れるとともに他の mode についても計算を進める予定である。

参考文献

- [1] K. Takata, Proc. of the 1990 Linear Accelerator Conference, Albuquerque, 1990.
- [2] H. Deruyter et al., Proc. of the 1990 Linear Accelerator Conference, Albuquerque, 1990.
- [3] T. Taniuchi et al., Damped Structure (II), this Meeting.
- [4] T. Weiland, Nucl.Instrum.Methods 212 (1983), 13.
- [5] T. Higo et al., Proc. of the 1990 Linear Accelerator Conference, Albuquerque, 1990.
- [6] T. Weiland, Nucl.Instrum.Methods 216 (1983), 329.
- [7] R. Miller, 3rd International Workshop on Linear Collider, Protvino, 1991.
- [8] Karl L.F. Bane, THE TRANSVERSE WAKE FIELD OF A DETUNED X-BAND ACCELERATOR STRUCTURE, SLAC_PUB_5783 MARCH 1992
- [9] K. L. F. Bane et al., THE COUPLED DIPOLE MODES OF THE NLC ACCELERATOR STRUCTURE, March 1992
- [10] M. Yamamoto et al., KEK preprint 91-153, Nov. 1991.
- [11] M. Yamamoto et al., Proc. of the 16th LINEAR ACCELERATOR MEETING IN JAPAN, 1991.