

EVALUATION OF THE RESOLUTION OF THE SR INTERFEROMETER AND THE IMPROVEMENT

T.Naito¹ and T.Mitsuhashi

High Energy Accelerator Research Organization(KEK), Accelerator Lab.

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan 305-0801

Abstract

ATF damping ring is using an SR interferometer with the Herschelian reflective optics to measure the vertical beam size. The measured vertical beam size reached to 5 μm with 40mm double slit separation and wavelength of 400nm. The measurable beam size of the SR interferometer has been investigated by changing the effective beam size. The measurement limit was 3 μm . The effects of the measurement errors were emphasized at higher visibility. To reduce the measurement errors, we tested an unbalanced interferometry. The preliminary result is presented.

SR interferometerの測定限界評価とその改善

1. はじめに

KEK-ATF ダンピングリングは、International Linear Collider(ILC)で必要な低エミッタンスビーム生成を主目的として実験が進められている。[1] ビームエネルギー1.3GeVで運転されており、1% カップリングを想定した垂直向エミッタンスは $1 \times 10^{-11}\text{m}$ であり、これはビームサイズモニタの場所では5.5 μm に相当する。ビームサイズモニタは5.5 μm に対して十分低い測定限界を持つ必要がある。KEK-ATFでは、可視光波長の放射光(SR)を使ったSR interferometerを開発し[2][3][4]、その改良バージョンであるHerschelian反射光学系を用いたSR interferometerは5 μm 以下の測定に成功した。[6]

ダンピングリングのエミッタンス調整は、さらに低い垂直向エミッタンスの生成を目指しており、 $\epsilon_y = 5 \times 10^{-12}\text{m}$ では4 μm 、 $\epsilon_y = 3 \times 10^{-12}\text{m}$ では3 μm のビームサイズの測定が必要となる。ビームサイズモニタは3 μm のビームサイズの測定が可能である必要がある。SR interferometerの測定限界を下げるためにいくつかの対策、1) 放射光のラインにある光学部品の再アライメントを行い垂直方向のアパーチャーを十分広げた測定が出来る様にする。2) 放射光の光路を気密パイプで覆うことによって気流の発生を止め、干渉縞が揺れるのを防ぐ様にする。等を行った。光学系、CCDの非線形性、入射光の強度差などシステムティックエラーを除いた後、SR interferometerの測定限界は、CCDのノイズが主

になる。今回は、SR interferometerのダブルスリット幅を変えることによって見かけ上、光源が遠くにある条件を作ることによってビームサイズ測定に対するノイズの影響を評価した。さらに、ダブルスリットへの入射光量を意図的に不平衡にし、観測する干渉縞のコントラストを意図的に下げることによって測定限界の改善を試みた。

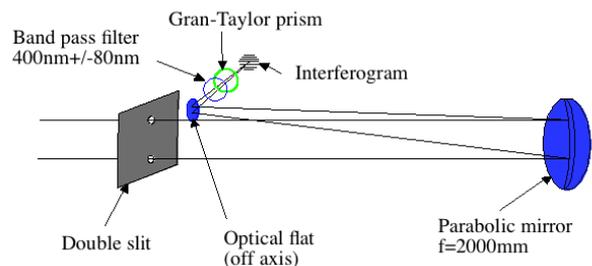


図 1 Herschelian 反射光学系を用いた SR interferometerのレイアウト

2. スリット幅と測定エラーの見積もり

ダブルスリットによる干渉縞の強度分布は、Van Cittert-Zernikeの定理[7]により、空間コヒーレンス度(γ)のフーリエ変換として表される。光源の形状がガウス分布の場合、光源のサイズ(σ)は

$$\sigma = \frac{\lambda L}{\pi D} \sqrt{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{1}{\gamma} \right)} \quad (1)$$

である。ここで λ は波長、 D はダブルスリットの幅、 L は光源点からダブルスリットまでの距離である。干渉縞のコントラスト V は、

¹ Mail address : takashi.naito@kek.jp

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 \cdot I_2}}{I_1 + I_2} |\gamma| \quad (2)$$

により求められる。ここで I_1, I_2 はそれぞれのスリットへの入射光の強度であり、 I_1, I_2 が等しいとき、干渉縞のコントラストは干渉度 $|\gamma|$ に等しい。コントラストは I_1, I_2 の強度差にはそれほど敏感ではない。 I_1, I_2 が1と0.9の場合、コントラストは0.998になり、ビームサイズへの寄与は $0.4\mu\text{m}$ 程度である。強度差を10%以下にすることはそれほど難しいことではない。

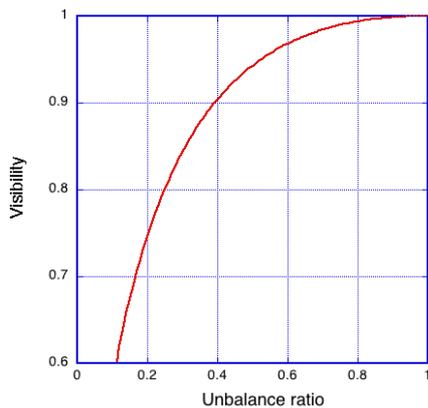


図2 入射光の強度差に対するコントラストの変化

図3は各ビームサイズに対するスリット幅と干渉度の関係である。コントラストが高くなると傾きは緩やかになるため、コントラストが高いところではビームサイズによるコントラストの変化が小さくなる。従って、測定エラーの影響を受けやすくなる。

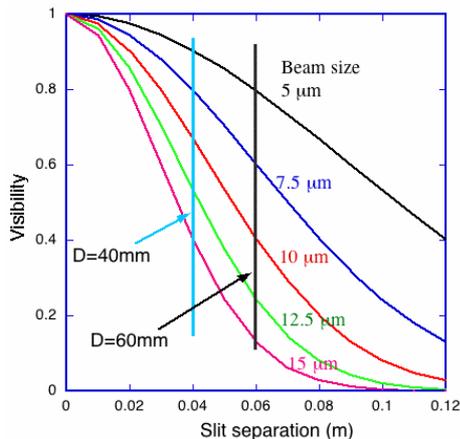


図3 各ビームサイズによる干渉度の変化

SR interferometer内部でのエラー（CCDノイズ）は、干渉度に対して一定値であるためにビームサイズが小さくなり干渉度が高くなった時に強調されることになる。従ってダブルスリットの幅は大きい方が測定エラーの効果が小さい。しかし、

放射光は垂直方向に発散角を持ち、一定以上上げると光量が減ってしまうためにあまり広くすることは出来ない。図3に於いてビームサイズが $5\mu\text{m}$ の場合、干渉度はスリット幅40mmで0.90であるが60mmで0.79まで下がる。ATFの場合、40mmで5mrad、60mmで8mradの発散角である。

3. 見かけ上の測定光源を変えた時のビームサイズ計測

ATFのビームでSR interferometerの測定限界以下の光源点を作ることは難しいため、擬似的に干渉度を変化させてSR interferometerで測定出来る最小ビームサイズを調べた。(1)式に於いて同一光源を測定している時、 D を小さくしてゆくと γ は次第に1に近づく。これは(1)式では、 L を大きくした場合と等しく、擬似的に光源点を遠くへ移動させたことになる。SR interferometerにエラーがなければ、 D を小さくし、元の D の値でビームサイズを計算するとビームサイズはゼロに近づくはずである。計算値がある値以下にならないければ、SR interferometerのエラーによるモニタの測定限界を示している。この測定では、光源点の大きさが一定、ダブルスリットへの入射光のアンバランスは十分小さい、光学部品の変形等は十分小さい、CCDのノイズは全面に渡って一定などを仮定している。

図4に測定結果を示す。スリット幅を小さくした場合、計算されるビームサイズはゼロ点を通る一次関数になるはずであるが、 $4\mu\text{m}$ あたりから次第に飽和して $3\mu\text{m}$ を切るあたりでは大分なだらかになっている様子が解る。ダブルスリットの製作精度の都合から20mm以下のスリット幅の測定は行わなかったが $3\mu\text{m}$ 程度がこのモニタの測定限界と思われる。

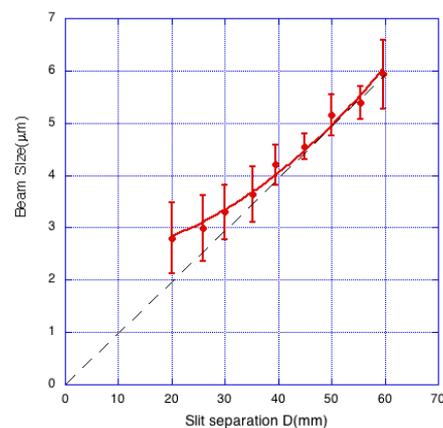


図4 スリット幅に対するビームサイズの変化

4. 入射光アンバランス時のビームサイズ計測

スリット幅を小さくした時の測定では、干渉度が高くなった時にエラーの効果が強調されることから、逆に干渉度を低くすることによってエラーの効果を低減出来ないかを考える。(2)式で I_1 , I_2 が等しくない場合、空間コヒーレンス度が高くても干渉度は I_1 , I_2 の比率で低減する。図5は I_1 , I_2 の比率が1:1の場合と1:0.3の場合のビームサイズに対する干渉度の変化の計算値である。他のパラメータは $\lambda=400\text{nm}$, $D=60\text{mm}$, $L=7\text{m}$ である。この計算ではビームサイズがゼロになる最大干渉度は1から0.86に下がる。

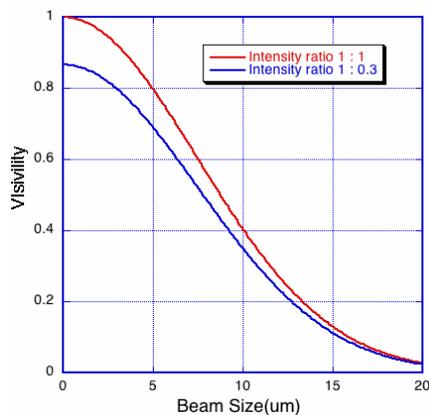


図5 入射光アンバランス時のvisibilityの変化

入射光アンバランス時の測定は次の様にして行った。減衰率を校正したND フィルター(減衰率0.853, 0.249)をそれぞれのスリットに入れて、アンバランス比0.292を作り、前章と同じ測定を行った。入射光の強度の調整やND フィルターの設置精度などから $D=30\text{mm}$ 幅の一点のみの測定であったが、改善が見られた。この結果から、この方法はSR interferometerの測定限界を改善する方法として有望なのではないかと思われる。

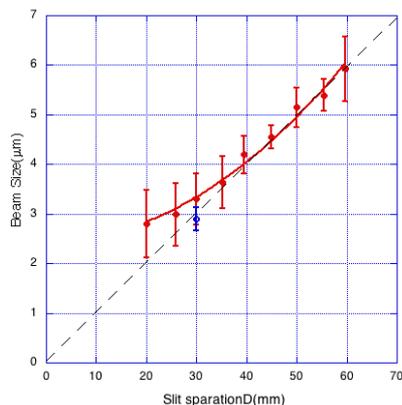


図5 入射光アンバランス時のビームサイズの測定(青点がアンバランス比0.292時の測定)

5. まとめ

ATF DRの低エミッタンスビーム計測のためにSR interferometerの性能評価と性能改善の試みを行った。擬似的にビームサイズを変えることによる測定では $3\mu\text{m}$ 程度までの測定が可能であることを示した。また、入射光をアンバランスにすることによって意図的にVisibilityを低くすることによって測定が改善する可能性のあることを示すことが出来た。この測定はまだ、予備実験の段階で今後、同一プレートに減衰率の違うND フィルターを制作し、再度、確認する予定である。

6. 謝辞

本研究に際し、生田施設長、山口主幹、横谷ILC推進室長に感謝致します。また、実験に協力していただきましたATFグループの方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] F. Hinode et. al., 'ATF Design and Study report', KEK Internal 95-4, June(1995)
- [2] T. Mitsuhashi, "Spatial coherency of the Synchrotron Radiation at the Visible light Region and its Application for the Electron Beam Profile Measurement", Proceedings of the Particle Accelerator Conference, Vancouver, May 12-16 1997
- [3] T. Mitsuhashi et al., "MEASUREMENT OF BEAM SIZE AT THE ATF DAMPING RING WITH THE SR INTERFEROMETER", PROC. OF SIXTH EUROPEAN PARTICLE ACCELERATOR CONFERENCE, Stockholm, 22 to 26 June 1998
- [4] T. Naito et al., "EMITTANCE MEASUREMENT AT KEK-ATF DAMPING RING", Proceedings of the Particle Accelerator Conference, New York, 1999
- [5] T. Naito et al., "EMITTANCE VERY SMALL BEAM SIZE MEASUREMENT BY REFLECTIVE SR INTERFEROMETER AT KEK-ATF", Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, 2006, pp1142-1144
- [6] T. Naito et al., "VERY SMALL BEAM-SIZE MEASUREMENT BY A REFLECTIVE SYNCHROTRON RADIATION INTERFEROMETER", Phys. Rev. ST Accel. Beams **9**, 122802 (2006),
- [7] M. Born and E. Wolf, "Principle of Optics", Pergamon press, (1980)