

V136b:エッジテーパを考慮したLiteBIRD光学系検討

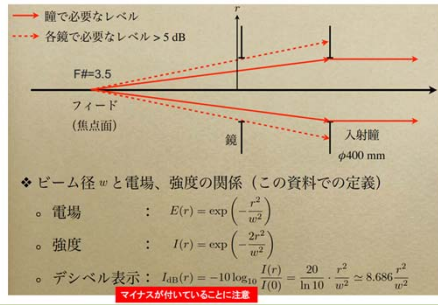
○鹿島伸悟¹⁾, 関本裕太郎¹⁾, 松村知岳²⁾, 菅井肇²⁾, 今田大皓³⁾ 他LiteBIRDメンバー

1:国立天文台 2:Kavli IPMU 3:JAXA/ISAS

背景と目的

- LiteBIRDはミリ波での観測を行うため、ミラーエッジでのビーム強が強いと、そこで回折・散乱した波が観測ビームに悪影響を及ぼす
- 物理光学解析ソフトGRASPを用いた解析により、瞳で必要なビーム強度(レベル)を確保するためには、途中の光学系(主にミラー)エッジで、最低の程度までビーム強度を落としておく必要があることが明確にされた
- 但し、この許容値は「無偏光から偏光への漏れこみによるサイドローブの差分がいくらまで許容できるか?」という観点のみ着目して導出したものであるため、今後の更なる検討で、もっと厳しくなる可能性はある
- といて、いつまでもミラーの有効範囲が明確にならないと光学設計がFixしないため、今回は上記観点での許容値を満たす光学系の設計を行い、各種性能だけでなく、迷光やゴーストにも光学設計があるかどうかを検討した

ビーム径と必要レベル



エッジテーパとビーム径

- 回折の影響が最も大きいのは、最も低周波(長波長)の場合である
 - LiteBIRDでは、ビームの帯域も考えた最低周波数は34GHzとなる
 - 34GHz近傍での、必要ビーム径を計算したものを下記する
 - 開口径 $\phi 400/F\#3.5$ の場合、入射瞳(開口径)の2.15倍の光束が主鏡・副鏡・半波長板(HWP)等で減らされない必要がある
 - その際のエッジテーパは5dBなので、linear強度では0.316となる(エッジテーパは瞳位置・瞳径での強度比のことである)
- | freq. / GHz | wave length / mm | beam waist / mm | edge taper / dB | r / 5dB / mm | r / 5dB / pupil | w / slit aperture / mm | w / slit pupil / mm |
|-------------|------------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| 30 | 9.9920819 | 6.8220769 | 0.8168989 | 488.0409937 | 2.4402050 | 643.2480141 | 3.2162401 |
| 31 | 9.6737245 | 6.9207768 | 0.8868990 | 472.3973538 | 2.3814687 | 622.8480281 | 3.1114904 |
| 32 | 9.3685143 | 6.9207768 | 0.9535771 | 457.0384016 | 2.2878922 | 603.9450132 | 3.0152251 |
| 33 | 9.0744619 | 6.9207768 | 1.0162113 | 442.8732007 | 2.2135862 | 584.7109119 | 2.9232446 |
| 34 | 8.7917432 | 6.9207768 | 1.0753112 | 429.8244092 | 2.1531220 | 567.5177771 | 2.8278588 |
| 35 | 8.5204988 | 6.9207768 | 1.1420972 | 418.2045118 | 2.0916043 | 551.3534048 | 2.7567772 |
| 36 | 8.2705683 | 6.9207768 | 1.2081492 | 408.7008811 | 2.0335041 | 536.6400117 | 2.6885001 |
| 37 | 8.0404989 | 6.9207768 | 1.2727571 | 395.7089138 | 1.9785446 | 521.5524438 | 2.6277822 |
| 38 | 7.8302752 | 6.9207768 | 1.3472310 | 385.2952414 | 1.9264719 | 507.8273795 | 2.5701389 |
| 39 | 7.6489981 | 6.9207768 | 1.4190709 | 375.6141640 | 1.8770207 | 494.8061847 | 2.4742008 |

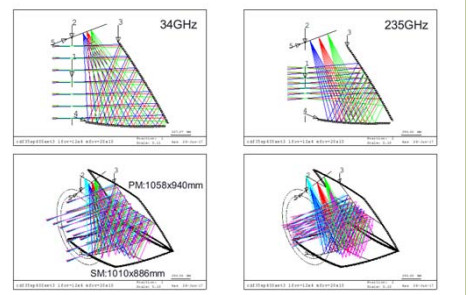
設計手法

- ガウスビームを用いて差補正をすることはできないため、設計時は以下のようにモデリングした
- 入射瞳径(EPD): 400*k (kは拡大係数、前述のr_5dB/r_pupil)
- k=2.15の際のビームエッジ強度PU1: 0.316
- 周波数は34GHzと235GHz、F#はEPD400mmに対して3.5
- システムを多重設計にし、第1状態はEPD400*k、周波数34GHz、PU10.316、FOV12x4deg内のみ補正する
- 第2状態はEPD400、周波数235GHz、PU11.0、FOV20x10degの軸外のみ補正する
- 有効範囲は両状態の大きい方となるため、エッジテーパを考慮した大きくなる
- 軸外の光束は $\phi 400$ にしているが、有効径を決めているのは圧倒的に軸上の低周波ビームである
- 性能は、それぞれの状態で最適化されるため、over estimateにはならない

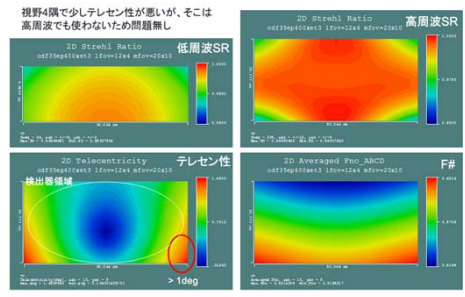
低周波用FOV12x4degの理由

- LiteBIRDでは像面を分割し、周波数帯の異なる検出器を、例えば下図のように配置する(L1,2:低周波用、M1,2:高周波用)
 - そのため、太いビームを必要とする最低周波用検出器は、例えば下図の赤四角内に配置し、高周波用はその外側に配置できる
 - これより、低周波用FOVはフルに取る必要は無く、中央近辺だけで良い
-

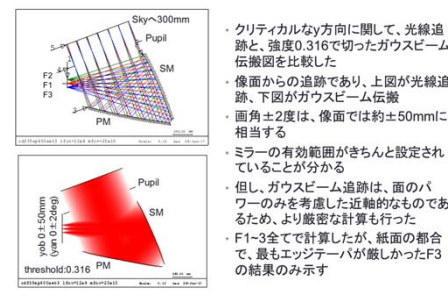
設計結果:透過型HWPタイプ光路図



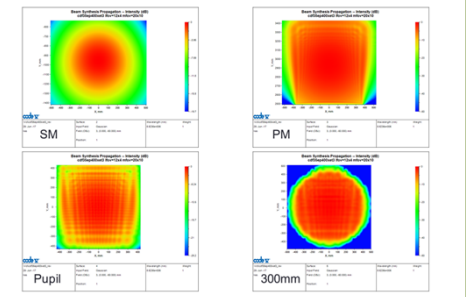
設計結果1:透過型HWPタイプ各種性能



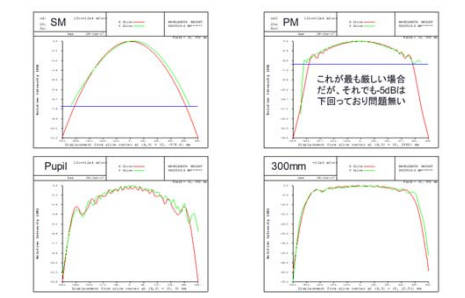
光線追跡 vs ガウスビーム伝搬



各面の電界強度(SMとPMの作図範囲はミラー外形)



各面の電界強度



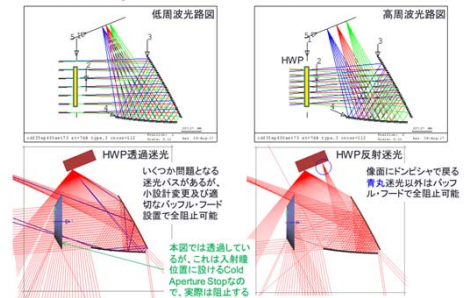
反射型HWPタイプ

- 入射瞳位置に透過型のHWPを配置することを考えているが、これには様々な技術的課題があるため、下図のように、副鏡と像面の間に反射型HWPを配置するタイプも検討している
 - このタイプは、メカ的なクリアランス確保が厳しく、あまり角を大きくできないため、入射瞳径を $\phi 600\text{mm}$ にしてAQを稼いでいる
 - 元々クリアランスの厳しい設計であるため、エッジテーパを考慮し、入射瞳径の2.15倍の光束を通すと、左図のようなになる
 - いたる所で光線と光学素子・光学素子同士が干渉している
 - もちろん回避設計を試みましたが、クリアランスと仕様(特にF#=3.5)を確保しつつ、所望の性能を満たすことは不可能であった
-

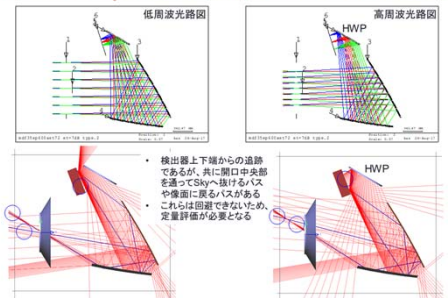
レンズレットのレンズ径変更

- 反射型HWPを用いたものは設計不可能であり、また透過型HWPを用いたものは、一応設計はできたが、あまりに低周波用ミラー有効範囲が大きくなり、バランスが悪い
- また、詳細は割愛するが、迷光的な問題が多いことが分かった
- これは、検出器レンズレットのレンズ径が小さすぎること起因しているため、そもそものレンズ径の見直しを行った
- 前述のエッジテーパ計算は、検出器レンズレットのレンズ径として $\phi 18\text{mm}$ を想定している
- このレンズ径を、検出器レイアウト上問題がなさそうな最大値である $\phi 30\text{mm}$ に大きくし、再度エッジテーパの計算を行った
- その結果、34GHz、F#=3.5、EPD400mmの場合、各ミラーエッジで必要なレベルは7dBであり、この場合の入射光束拡大係数は1.52で済むことがわかったため、この条件で再設計を行った

レンズ径 $\phi 30\text{mm}$ /透過型HWP設計結果



レンズ径 $\phi 30\text{mm}$ /反射型HWP設計結果



まとめと今後の課題

- 検出器そのものを見直し、レンズレットのレンズ径を $\phi 30\text{mm}$ にすることで、透過型HWP/反射型HWP何れのタイプも一応光学設計はできた
- 現状の仕様を下記する
 - 透過型HWPタイプ
 - 高周波: FOV20x10deg, 開口径 $\phi 400\text{mm}$, AQ ≈ 1 , F#=3.5
 - 低周波: FOV12x4deg, 開口径 $\phi 612\text{mm}$ (1.53倍)
 - 反射型HWPタイプ
 - 高周波: FOV13.4x6.6deg, 開口径 $\phi 600\text{mm}$, AQ ≈ 1 , F#=3.5
 - 低周波: FOV13.4x2.8deg, 開口径 $\phi 918\text{mm}$ (1.53倍)
- ミラー及びHWP多重反射による迷光は、透過型HWPタイプに関しては回避設計が可能と思われる
- 一方、反射型HWPタイプに関しては回避設計が困難であるため定量評価が必要であり、これが今後の課題である
- 但し、共に検出器に戻るビーム(透過型はドンピシャ集光、反射型は全体に広がる)があり、不可避であるため、これに関しても定量評価が必要