

V122b: LiteBIRD クロスドラゴン光学系設計 非球面次数と性能

○鹿島伸悟¹⁾, 関本裕太郎¹⁾, 松村知岳²⁾, 菅井肇³⁾, 木村公洋⁴⁾, 羽澄昌史⁵⁾ 他 LiteBIRD WGメンバー

1: 国立天文台 2: JAXA/ISAS 3: 東京大学 4: 大阪府大 5: KEK

CMB観測衛星 LiteBIRD

- LiteBIRDの科学目的は、ビッグバン以前の宇宙の姿、つまり宇宙の始まり直後の指数関数的膨張時代(インフレーション期)の存在を検証することである
- これにより発生する原始重力波の痕跡として、宇宙背景放射(CMB)に現れる偏光の空間的パターン(Bモード)を測定する
- CMB以外に銀河系内からの放射(シンクロトン放射やダスト放射など)をスペクトル形状から成分分離するために、**35GHzから450GHzの観測帯域にて偏光測定**を行う
- 主光学系はコンパクトでありながら広視野に対応したクロス・ドラゴンタイプで、主鏡・副鏡共に**アナモルフィック非球面**である
- 主鏡より右側にある入射開口位置に、空からの直線偏光成分を望遠鏡以降に人工的に持ち込まれる成分から分離するための連続回転半波長板(HWP)を設置する

光学系に求められる仕様

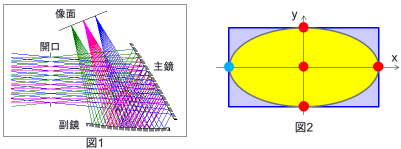
- 仕様
 - 入射口径: 400mm以上 → 大きいほどキャリブレーション性能が向上する
 - 画角: **x方向 $\pm 10.5\text{deg}$, y方向 $\pm 5.5\text{deg}$** → 広いほど全天サーベイが速い
 - Fno: 3.5~2.5 → 全体の大きさとPSF径を決める
 - 周波数: 35~450GHz: 設計には波長として切りの良い150GHzを使用
 - ミラーと瞳は150mm以上離す: 構造を考慮
 - 光束と瞳位置は150mm以上離す: HWP設置を考慮
 - フード等も含めて $\phi 1.7\text{m} \times 1.7\text{m}$ の領域に納まること: フェアリングサイズ
- 設計時に押さえている「性能以外」のパラメタは以下のもの
 - 光軸交差角: 112deg程度 → 直角より遠光に強い
 - 各面角での像側telecentricity $< \pm 0.5\text{deg}$
 - 各面角での実効Fno = 各面角での実効焦点距離
 - 各面角でのPSFのeccentricity < 0.02
 - 光束・光学素子(ミラーや瞳等) $> 30\text{mm}$ → 回折迷光を防ぐため

光学系に求められる性能

- 結像性能は波面収差(ストレーラ強度:SD)で評価する
- ミラーを用いた反射光学系であるため所謂色収差は存在せず、周波数毎の性能は単に係数倍となる
- 当然、最も周波数が高い(波長が短い)場合が最悪である
- 波面収差rmsの単位は λ であるため、波長が λ になるとrmsの値が $1/\lambda$ 倍となる(λ はレファレンス波長 $=2[\text{mm}]=150[\text{GHz}]$)
- ストレーラ強度SDとrmsの関係は $\text{SD} = \exp[-(2\pi \cdot \text{rms})^2]$ である
- 目標性能は、**最短波長(1.07[mm]=280[GHz])においてSD > 0.95** としたため、 **$r_r \text{で} 0.019(\text{rms}) = \text{SD}0.985$** になる
- 偏光観測を行うため、光学系の**偏光特性も良好**しておく必要がある
- 偏光特性は、簡単に**偏光面の回転量**、詳細には**Mueller Matrixの非対角成分の大きさ**で評価した
- ミラー形状や構成だけでなく、アルミ反射面の物性値も考慮した
- 但し、アルミも保護膜も極低温の値ではなく、**170K近傍の値**である

設計方針

- 光学系はy方向(図1紙面内)のみ偏心しており、x方向は左右対称
- 主鏡はy方向にshiftした**アナモルフィック非球面**(後述)
- 副鏡は、y方向にshift & tiltした**アナモルフィック非球面**
- 像面は図2のようにx方向が長い形状をしており、設計時の評価画角は図2の●位置である(●は有効径計算のため)
- 設計後の評価は視野全面に亘って行っている
- 但し、長方形(青枠)の視野になるか楕円(黄色部)になるかは未定



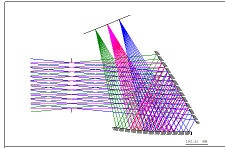
設計自由度とconstraints

- 各項目に関して、constraintsを概算すると以下のようになる
 - 光束と瞳位置は30mm以上離す → 1
 - 光軸交差角: 112deg程度 → 1
 - 各面角での像側telecentricity $< \pm 0.5\text{deg}$ → 4
 - 各面角での実効Fno = 各面角での実効焦点距離 → 4
 - 各面角でのPSFのeccentricity < 0.02 → 4
 - 光束・光学素子(ミラーや瞳等) $> 30\text{mm}$ → 5
- これらを足すと**constraintsは合計19**となる
- 従来のクロスドラゴン光学系では、主鏡・副鏡共に偏心コニク面が用いられていたが、それでは**各面でR(主曲率半径)とK(コニク係数)、偏心4自由度で6自由度**しかない(偏心はy方向のみとする)
- 主鏡・副鏡合わせても12自由度**であり、constraintsだけ考えても明らかに自由度が不足している
- 当然、これを抑えた上で「収差補正」も行う必要があり、全然足りないことは明らかである

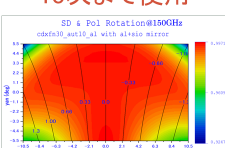
アナモルフィック非球面

- アナモルフィック非球面は、以下の式で表される曲面である
- x方向とy方向でそれぞれ異なるR・k・非球面係数をもつ形状であり、**回転対称ではないが、x軸・y軸に関しては対称**である
- $$z = \frac{(cux)^2 + (cuy)^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + kx)(cux)^2 - (1 + ky)(cuy)^2}} + ar(1 - ap)x^2 + (1 + ap)y^2 + br(1 - bp)x^2 + (1 + bp)y^2 + cr(1 - cp)x^2 + (1 + cp)y^2 + dr(1 - dp)x^2 + (1 + dp)y^2$$
- ここで、cux, cuyは、x, yの曲率、kx, klyは、x, yのコニク係数、ar, ap等は非球面係数を表す
- 設計に自由曲面を使うという手もあるが、全く対称性のない面形状は見通しが悪く扱いにくい
- 上記10次までの係数を全て用いれば**自由度は12**となり、主鏡・副鏡合わせて**24自由度**となるため、設計自由度が格段に上がる
- これが、主鏡・副鏡共にアナモルフィック非球面を用いた理由である

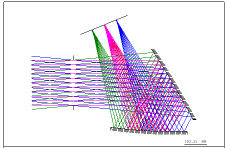
Fno=3.0



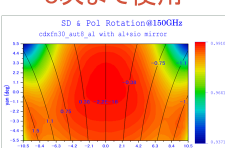
10次まで使用



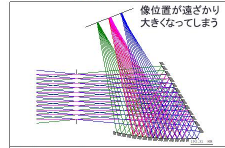
Fno=3.0



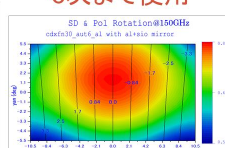
8次まで使用



Fno=3.0

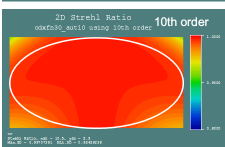
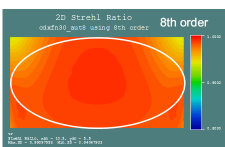
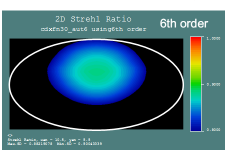


6次まで使用



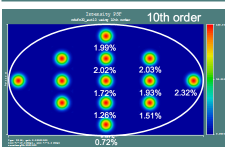
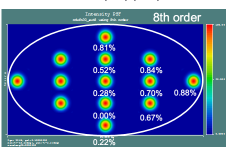
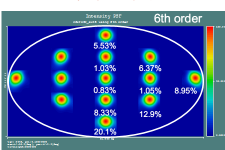
Fno=3.0 SD比較

- 10次・8次・6次まで使用した場合のSD@150GHzの同レンジ(1.0~0.8)比較
- 白楕円の領域で見て、6次までしか使っていないものは全然性能が出ていない
- 8次と10次はそれほど変わらないが、良く見ると白楕円内の均一さが違い、やはり10次まで使った方が性能が出ている
- 但し、設計性能での比較なので差があるが、実際に作れば差は無いと思われる
- 8次までと10次までで製造性に差があるなら、8次の方でもOKと思われるが、たぶんそんなことはないだろう



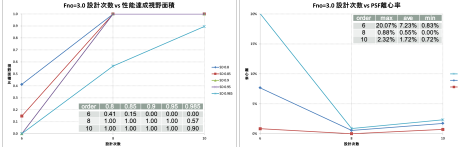
PSF真円度比較

- 視野の中の13点に関してPSFを計算し、並べて表示したものを
- 視野の大きさに対するPSFの大きさは実寸ではなく、真円度を見るためのマップ
- 10次・8次はあまり変わらないが、6次まではかたがたしていないのは真円度悪い
- 特に視野下半分が著しく多化している
- 国内の真字[%]は、計算したPSFを偏心・傾きを数字で楕円から計算した離心率である
- 計算式は下記である
 - 離心率 $e = (a-b)/(a+b)$



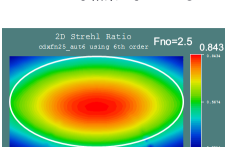
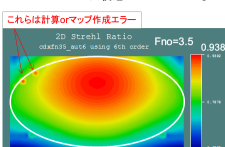
設計次数 vs. 実視野 & PSF真円度

- SD0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 0.985に関して、設計次数と実視野(性能達成視野)面積をグラフ化した。やはり**6次は非常に実視野が狭い**
- SD0.9はSD0.95と全く同じ数値なので、下図では重なってしまっている
- 面積は、SDマップに楕円をfittingさせて、その面積で見積もった
- PSF真円度に関して、離心率Max, Average, Minを設計次数に対してグラフ化した
- 8次設計が10次より離心率が小さいが、特に狙った訳ではなかったためである(設計時に厳密にPSF離心率を抑えるのは不可能である)



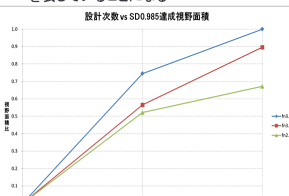
Fno=3.5 & Fno=2.5

- 同様の解析をFno=3.5と2.5に関して行った(Fno以外の仕様は同じ)
- 6次までしか使わなかった場合のSDマップを以下に示す
- 予想通り、Fnoが小さくなると低い次数しか使わない場合、著しく性能が劣化している
- Fno=3.5では最悪SDが0.638であるが、Fno=2.5では0.291まで低下
- Fno=3.0では最悪SDが0.506なのとreasonableな結果となっている



各Fnoの比較

- SD > 0.985 という究極の性能を満たす視野面積に関して、Fnoと次数で比較したグラフを示す
- Fnoによって像面の大きさは変わるため、**画角の広さ(x画角*y画角)**を表していることになる



- このオーダーでは**10次と8次の差も結構**あることが分かる
- Fnoが小さいほど、より大きな次数まで必要になることも分かる
- 10次を使ってもFno=3.5以外では完全には全視野で性能を満たせてはいない
- 但し、Fno=3.5はPSF、ひいては検出器や光学系全体が大きく、**偏光特性も劣化**していることが分かる
- これがBestという訳ではない

まとめと今後の展開

- 今回は開口径 $\phi 400\text{mm}$ のものしか示さなかったが、設計検討は開口径 $\phi 550\text{mm}$ と $\phi 600\text{mm}$ に關しても行っている
- 打上時の搭載スペースに限られるため、開口径を大きくても焦点距離を伸ばして全体を大きくすることはできないため、必然的にFnoが小さくなる
- そのため、例えば**開口径 $\phi 600\text{mm}$ のものでは、8次まで使っても所望の性能が出ず、10次が必要**となる
- 設計時に高次の項が必要ということは、それだけ面形状に敏感ということであるから、製造性が悪くなる(製造誤差に強い)方向である
- 何れにせよ、8次や10次の高次項は設計上必須であり、この原因は、多くのconstraintsを抑える必要があることにあるが、それ以上にレンジで**21x11[deg]**という極めて広い視野で性能を出したからである
- 偏光特性に関しては、**8・10次は良好**であるが、やはり6次までの設計では**偏光回転量が大きく、偏光特性も劣化**していることが分かる
- 今後は、設計性能と製造性、キャリブレーション性能や波長板の口径制限等に留意しつつ、LiteBIRDに最適な解を見つけていく