

ALMA Band8 SIS Mixer 量産結果の分析

国立天文台 先端技術センター

ALMA Band8 岩国幹夫 飯塚吉三 新関康昭

1. はじめに

ALMA 受信機主要部品の 1 つであり、超伝導 SIS デバイス製作から組立、試験まで全ての工程を天文台内で行っている SIS Mixer Block の必要数量 320 台全ての供給が無事に終了した。

そこで SIS Mixer Block 量産過程での問題点整理、今後の SIS Mixer 受信機参考資料作成を目的として、これまでに実施した SIS Mixer Block 単体試験の全評価データを分析し、高周波特性と DC 特性の相関性を検証する。更に SIS Mixer DC 特性及び高周波特性の印加磁界強度に対する依存性についても追加試験を行いその結果を紹介する。(以降、測定データ上の理由で DSB Mixer Block と称する)

他に、DSB Mixer Block 量産過程において実施した測定設備の改善及びその効果についても説明する。

2. DSB Mixer Block 概要

図 1 に DSB Mixer Block の構造を示す。[1]

図 1 左側 Block は SIS Mixer Chip が実装される筐体で、RF 及び Local 信号入力用の WR2.2 導波管、IF 出力の同軸コネクタがあり、これに蓋をする筐体が右側の Block で、WG Short 及び超伝導マグネットコイルが取り付けられている。左右の筐体を勘合するとマグネットヨークが SIS Chip から 1mm の距離に配置され 300 Gauss 以上の磁界を SIS Junction に印加可能な構造になっている。

図 2 は SIS Chip 写真で、写真右側は導波管面の電界方向に実装した石英基板 SIS Mixer Chip で、同写真上部側から DC GND、WG / MIC 変換、RF 整合回路、SIS Junction、IF Filter のパターンが形成されている。

写真中央付近の拡大図が左側の写真で、上端部分 2 箇所 SIS Junction 及び Micro strip line (MSL) が形成され、これら 2 つの Junction 容量と MSL にて π 型共振回路を構成する事で Junction 容量によるインピーダンス低下を防いでいる。

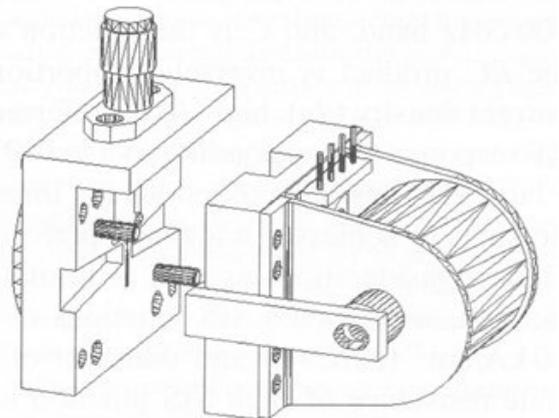


図 1. DSB Mixer Block の構造

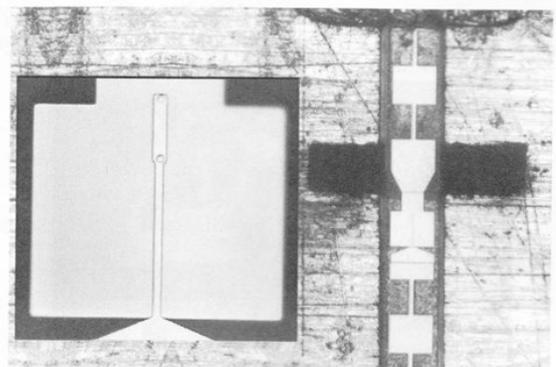


図 2. DSB Mixer SIS Chip 写真

3. DSB Mixer 量産試験結果

DSB Mixer Block の量産試験工程は次の順序で行う。

- | | |
|---------------------------------|------------------------------------|
| a) 薄膜、パターン形成後、SIS 集合の切出し | d) 4K で DSB Mixer 単体 DC 及び RF 特性試験 |
| b) 4K で SIS DC 特性試験、個別 Chip 切出し | e) RF 特性に近い 2 個の DSB Mixer Pair 選択 |
| c) Mixer 筐体に SIS Chip MT、常温抵抗試験 | f) Cartridge 実装、総合試験にて最終判定 |

以降の説明は上記項目(b)及び(d)の工程に関して主に述べる。

図 3 に DSB Mixer Block 単体試験全データの集計結果 (536 台)を示す。DSB 試験 NG は全体の 1/4 程度でその内訳は、23%が DSB 雑音スペック 130K 以下に対してスペックアウト、2%が DC Check

検査 NG、1%が DSB IF 出力不安定である。
 そこで DSB 試験の主な不良項目である雑音特性
 スペックアウトに関して検討を行った。
 検討結果を次項に説明する。

4. DSB Mixer 雑音スペックアウトに関する検討
 DSB Mixer 単体試験データの中で非常に優れた RF
 特性を有するものと劣っているもの各 10 個を抽出
 し、それらに使われている SIS Chip の DC 特性を
 比較することで、DSB Mixer RF 特性と SIS Chip
 DC 特性の関連性を調べた。

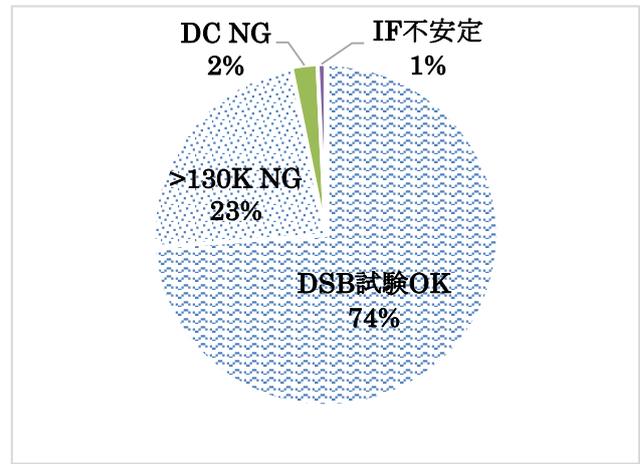


図 3. DSB Mixer 量産試験結果

図 4 a に高周波特性の優れた DSB Mixer (良品グループ)、図 4 b に不良品グループの個々の特性を示す。

図 4 a, b 間
 において、雑音
 特性は 40 ~
 50K、利得特
 性は 2 ~ 4dB
 の差が確認で
 きる。
 仮定として、
 SIS Chip 検査
 工程で図 4 b
 の SIS Chip を

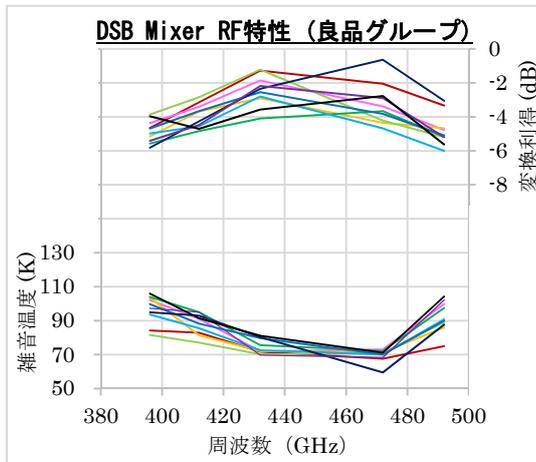


図 4 a. 高周波特性 (良品)

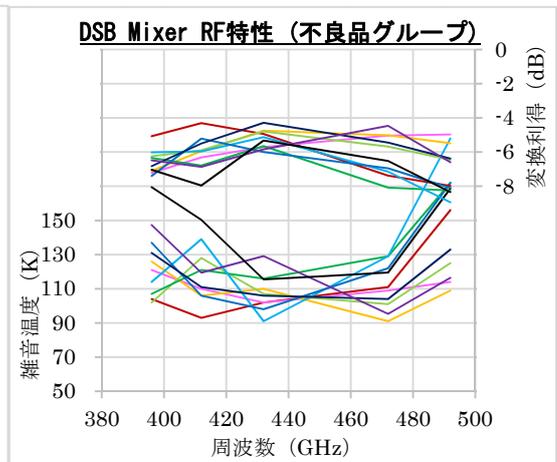


図 4 b. 高周波特性 (不良品)

選別できれば量産の効率化及び DSB Mixer 平均的特性の改善が期待できる。

次に、図 5 a, b は、上記 DSB Mixer 良品及び不良品グループに使用されている SIS Chip を含め、合計約 40 個の DSB Mixer SIS Chip の DC 特性 (V-I 特性) を示す。図 5 a は SIS Chip 試験工程、図 5 b は DSB Mixer 試験工程の結果である。尚、SIS Chip 試験工程での V-I 測定は、設備上及び技術的な理由により超伝導マグネット磁界の印加が無い条件で実施している。図 5 の SIS Chip V-I 特性において、電流が急峻に立ち上がる電圧を Gap Voltage (V_g)と言う。SIS Chip 試験工程では良不良品間で V_g に差異は見られないが、DSB Mixer 試験工程においては僅かに重なっている部分はあるものの、 V_g は RF 特性良品不良品間で平均 0.2v 程度の違いが確認される。この結果は、DSB Mixer 高周波特性の優劣に関し、

SIS Chip 磁
 界印加条件
 の V_g 値にて
 完璧では無
 いものの分
 類が可能で
 ある事を示
 している。
 次に、SIS
 DC 特性の重

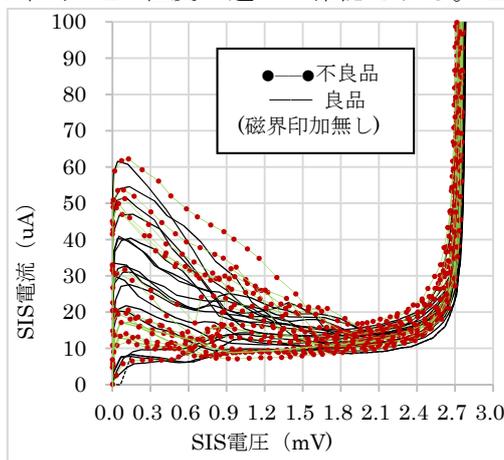


図 5 a. SIS Chip 試験 V-I 特性

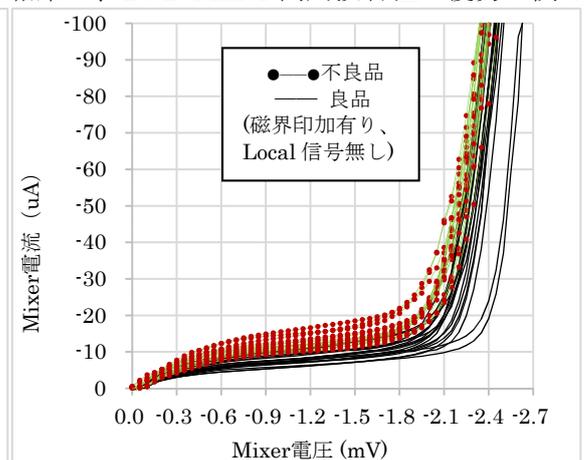


図 5 b. DSB Mix.試験 V-I 特性

要パラメータの1つである R_{sg}/R_n 値に関して測定データの分析を行う。 R_{sg} 値は SIS V-I 特性で 1.0~2.0V Bias 付近の抵抗値を標準化した値で、V-I 特性から求められる。図6は、上記 V-I 特性と同一の SIS Chip に対して R_{sg}/R_n 値の分布を表したグラフである。この結果では V_g 特性同様、DSB Mixer RF 特性の良不良品に対して 12~13 の R_{sg}/R_n 値にて Chip 分類が可能と思われる。

5. SIS R_{sg}/R_n 値の磁界強度依存性

前項の結果にて SIS Chip への磁界印加は RF と DC 特性相関性の重要な条件である事が判った。そこで SIS Mixer の R_{sg}/R_n 値及び RF 特性に関して、磁界印加レベル依存性の実験を行った。図7に7個の DSB Mixer R_{sg}/R_n 値の Magnet 電流依存性を示す。おおむね似た様な特性に見えるが、その中で最初は同じ値で Magnet 電流増加と共に値が異なる U052 と B260、また U052 とほぼ平行な特性を持つ U061 の合計3個を取り上げ、DSB Mixer RF 特性の Magnet 電流依存性に関して試験を行った。

図8 a, b, c に U052, B260, U061 の DSB Mixer RF 特性を示す。破線は実測値で実線はその近似曲線である。まず、図7で Magnet 電流 10mA 時の R_{sg}/R_n 値が同一であった U052 と B260 の RF 特性を比較すると(図8 a, b)

周波数特性の形は異なるが Magnet 電流 10mA 時の最小雑音値は何れも 45K 程度で同じである。

一方 Magnet 電流を 20mA 及び 30mA に増加した時の雑音温度は U052 に比べて B260 は大きく増加している。

次に U061(図8 c)を見てみると、10mA 時の最小雑音は 65K 程度でそれ程良くないが、Magnet 電流増加による雑音特性の劣化は B260 程大きくは無い。(30mA 時 500GHz 付近の雑音増加は利得低下による測定系 IF の影響)

以上の結果から、DSB Mixer 雑音特性に関する事前検査として、SIS Chip DC 特性 R_{sg}/R_n 値の Magnet 電流依存性を検証することは有益な SIS Chip 選別基準の1つになると考えられる。

6. 測定系の改善

DSB Mixer 量産において、測定の効率及び精度向上を目的に測定系の改善を図り、結果として当初の目的以上の改善効果を得ることが出来た。それは DSB Mixer

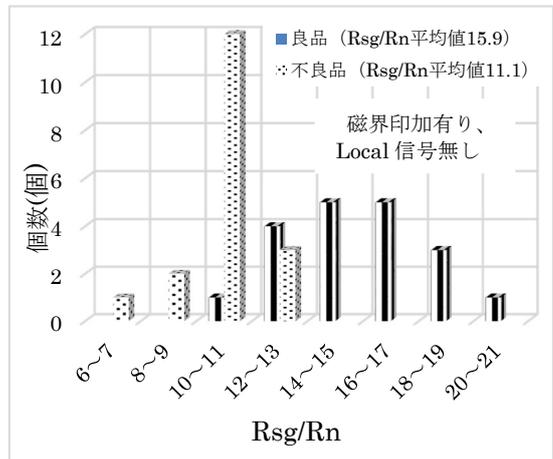


図6. RF 特性良不良品の R_{sg}/R_n 値分布

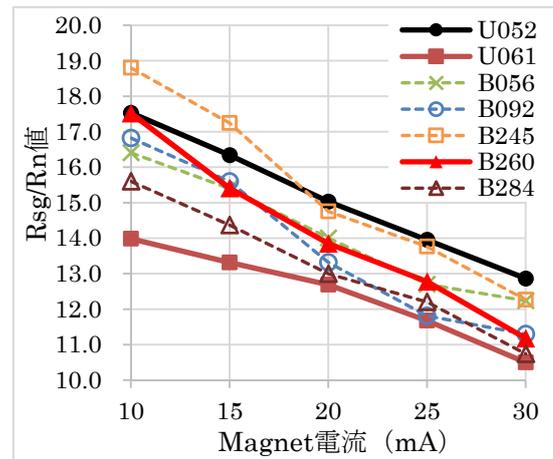


図7. DSB Mixer R_{sg}/R_n の磁界依存性

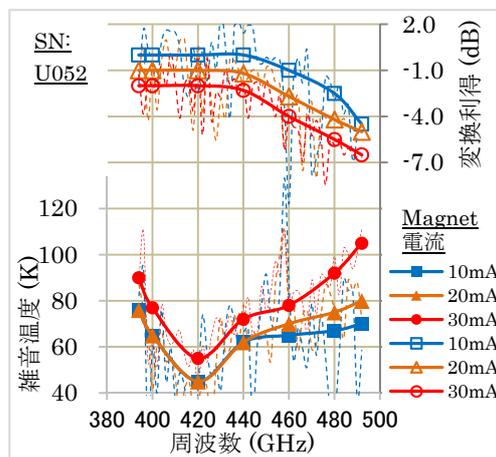


図8 a. DSB Mix. U052 磁界依存性

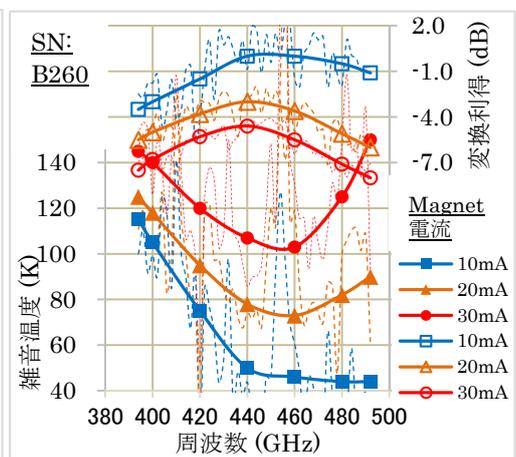


図8 b. DSB Mix. B260 磁界依存性

量産途中の Cartridge 総合試験で狭帯域雑音劣化現象による雑音スペックアウト問題が発生したが、従来の試験方法では見落としていたこの問題が、改善された自動測定系では検出可能であり、更に狭帯域雑音劣化周波数の特定も可能になった事である。

図 9 に従来方法と改善された自動測定系の結果を示す。

従来の測定では Band8 帯域内 6 周波数の測定であったが改善された自動測定では 1GHz Step で 115 周波数の測定がほぼ同じ所要時間で可能となった。

図 10 に狭帯域雑音劣化特性を示す。 図中の特性は Local 周波数 415~419GHz、1GHz Step で測定した IF 帯域内 (4~8GHz) 雑音を同一グラフ内に重ねてプロットしている。狭帯域雑音劣化とは図 10 に見られる様な数百 MHz 程度の帯域幅で急峻に雑音温度が増加する現象を言い、このケースでは DSB Mixer RF 周波数 410.7GHz において狭帯域雑音劣化が発生している事が判る。

改善された測定系では図の様に雑音劣化周波数が Local 信号周波数に合わせて移動して行く波形を確認することにより雑音劣化現象と劣化周波数を正確に検出できる様になった。

7. まとめ

- DSB Mixer 量産試験全データの集計、分析を実施
- DSB Mixer RF 特性と DC 特性に着目、RF 特性良不良品に対して SIS Mixer Vg 及び Rsg/Rn に差がある事を確認
- DSB Mixer の Magnet 電流依存性に関して、DC 特性と RF 特性の相関性を示す。これは今後の SIS Chip 選別及び受信機の Mixer Magnet 電流制御に関して有益な情報である。
- DSB Mixer 測定系の改善により、測定の効率化を図り、更に従来見落としていた狭帯域雑音劣化問題に関し問題検出と正確な周波数測定を可能とした。

8. 謝辞

Band8 SIS Mixer Chip 製作及び SIS Mixer Chip 検査資料

の提供を頂いた田村友範様、Mixer Block 組立、自動測定等に協力を頂いた佐藤直久様、熊谷収可様、高橋康夫様及び適切なアドバイスを頂いた関本裕太郎様に深く感謝いたします。

9. 参考文献

- [1] Wenlei Shan, Takashi Noguchi, Shengcai Shi, and Yutaro Sekimoto, "Design and Development of SIS Mixers for ALMA Band 8," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 15, No.2, pp. 503-506 June 2005.

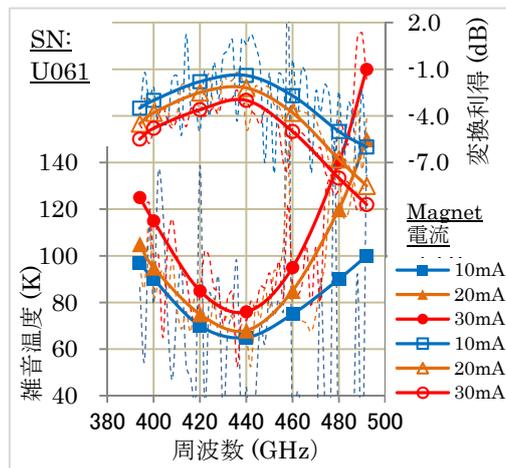


図 8 c. DSB Mix. U061 磁界依存性

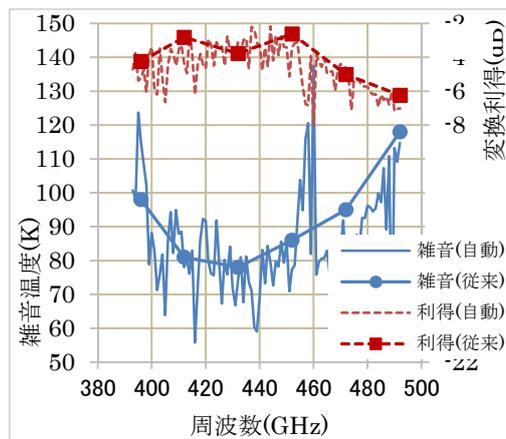


図 9. DSB Mix. 測定系による相違

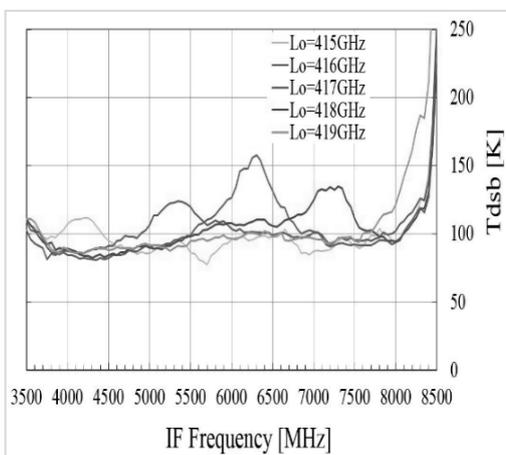


図 10. DSB Mix. 狭帯域雑音劣化