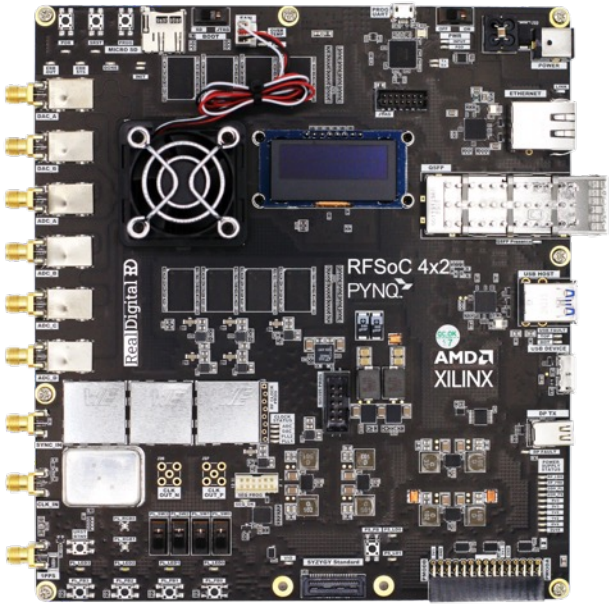
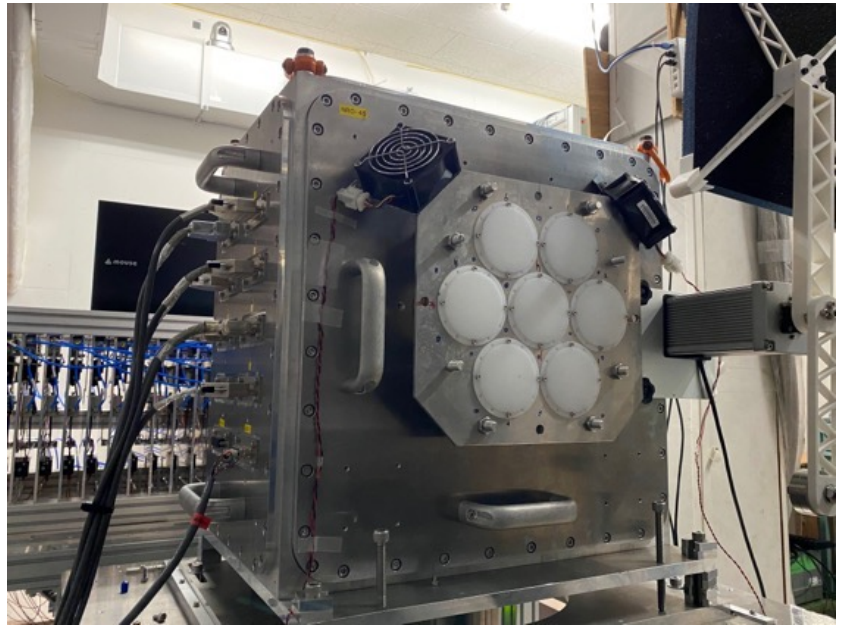
RFSoC を用いた電波分光計による 7BEE の拡張

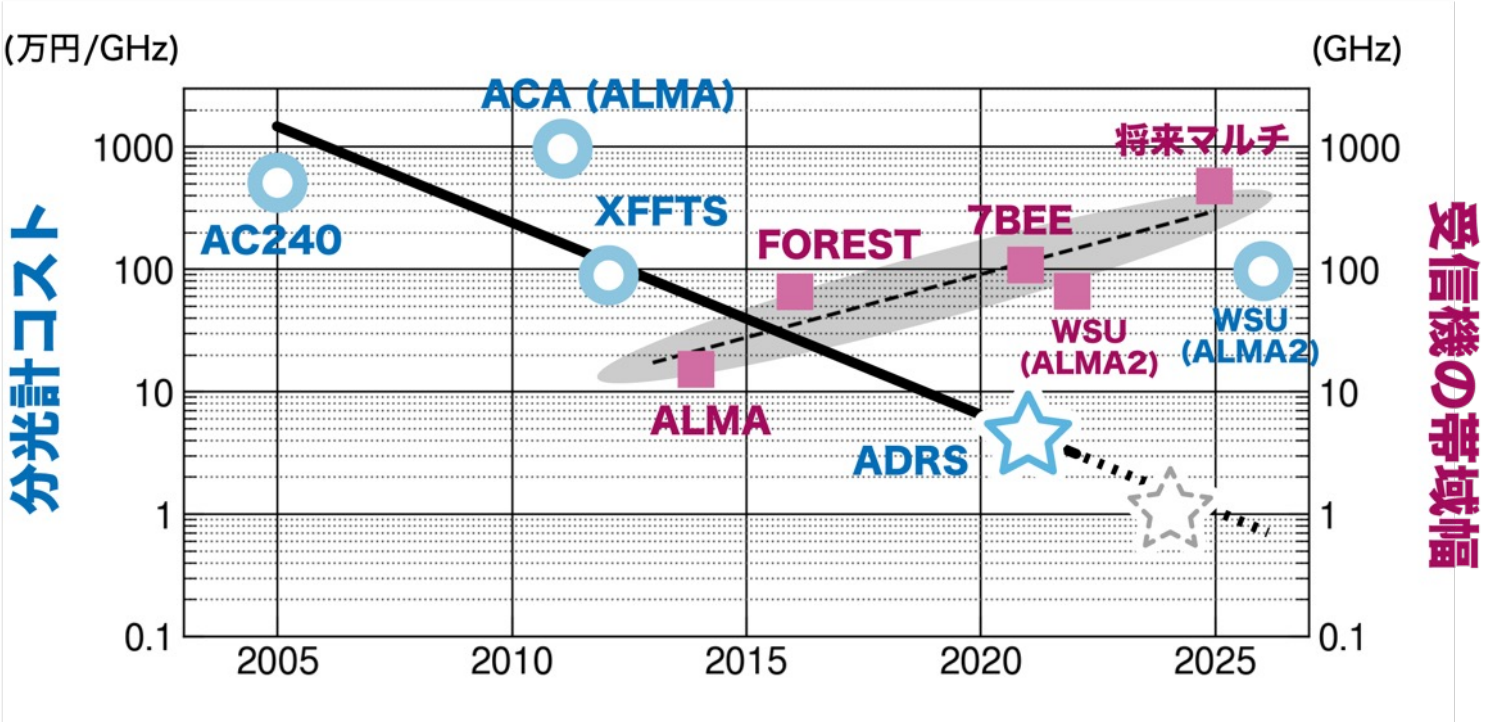


7BEE
7-Beam Equipment
for Nobeyama 45m Telescope



西村淳　（野辺山宇宙電波観測所）

受信機と分光計の周波数帯域



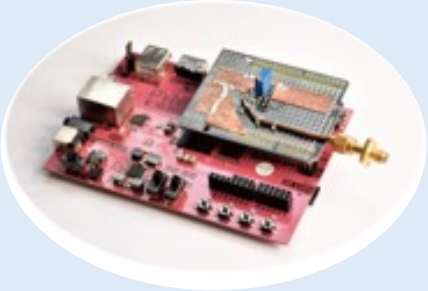
ミリ波広域観測の課題

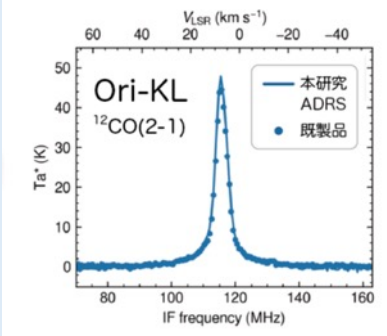
受信機：

- 広帯域化が進められている

分光計：

- 広帯域のものは ALMA2 (WSU) で開発予定
- コストパフォーマンスが良いものは世界的にもあまり開発/検討されていない





Nishimura+2021b, PASJ

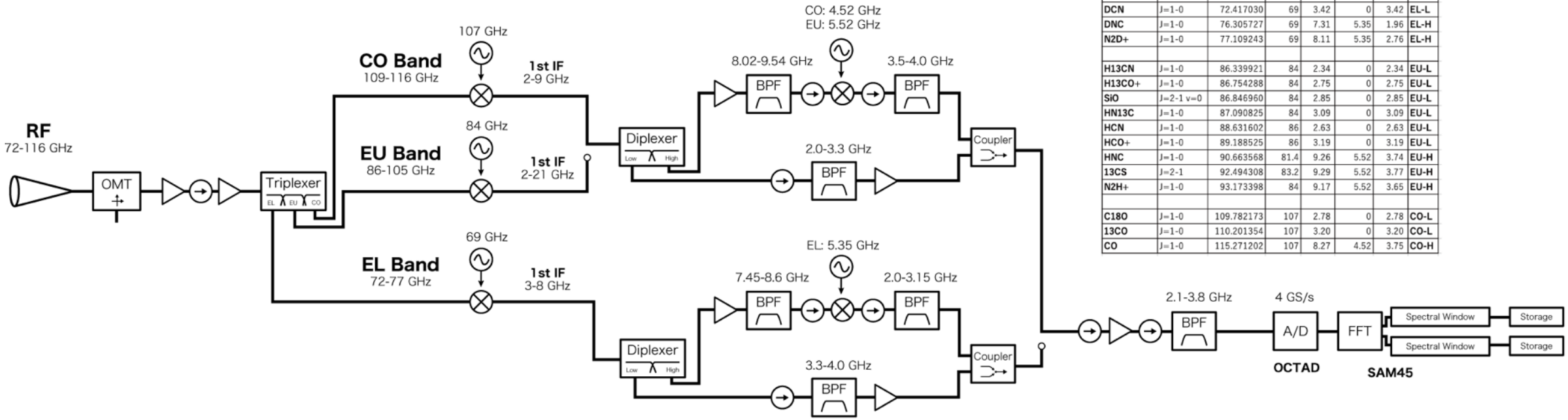
All-Digital Radio Spectrometer (ADRS)

- FPGA上の素子を利用してデジタイザを実装
- 技術の基礎的な検証段階
- 量子化効率が低く、その改善が課題

RFSoC RS

- FPGA上にハード実装されたADCを利用
- 世界的に動作検証が進められている
- 科学目的によっては高効率な分光計を実装可能

現在の 7BEE



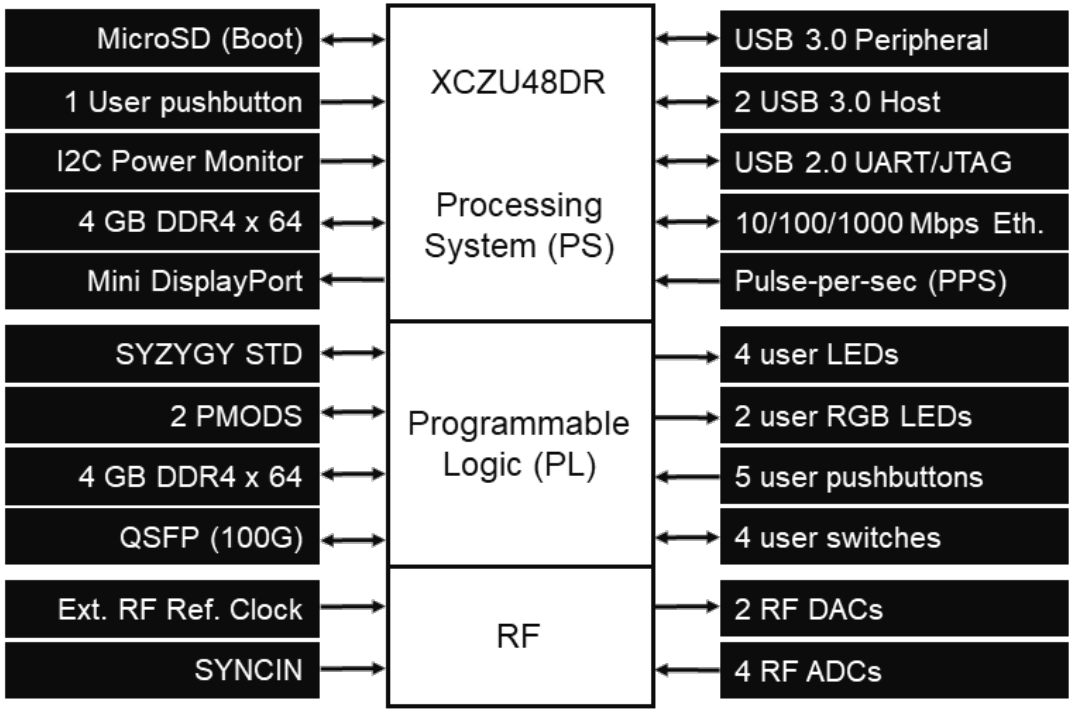
Species	Transition	Frequency (GHz)	1st LO (GHz)	1st IF (GHz)	2nd LO (GHz)	2nd IF (GHz)	Bnad
DCO+	J=1-0	72.039312	69	3.04	0	3.04	EL-L
DCN	J=1-0	72.417030	69	3.42	0	3.42	EL-L
DNC	J=1-0	76.305727	69	7.31	5.35	1.96	EL-H
N2D+	J=1-0	77.109243	69	8.11	5.35	2.76	EL-H
H13CN	J=1-0	86.339921	84	2.34	0	2.34	EU-L
H13CO+	J=1-0	86.754288	84	2.75	0	2.75	EU-L
SiO	J=2-1 v=0	86.846960	84	2.85	0	2.85	EU-L
HN13C	J=1-0	87.090825	84	3.09	0	3.09	EU-L
HCN	J=1-0	88.631602	86	2.63	0	2.63	EU-L
HCO+	J=1-0	89.188525	86	3.19	0	3.19	EU-L
HNC	J=1-0	90.663568	81.4	9.26	5.52	3.74	EU-H
13CS	J=2-1	92.494308	83.2	9.29	5.52	3.77	EU-H
N2H+	J=1-0	93.173398	84	9.17	5.52	3.65	EU-H
C18O	J=1-0	109.782173	107	2.78	0	2.78	CO-L
13CO	J=1-0	110.201354	107	3.20	0	3.20	CO-L
CO	J=1-0	115.271202	107	8.27	4.52	3.75	CO-H

- 7BEE 出力： 616 GHz
- SAM45 入力： 32 GHz

→ 記録できるのは 5 % のみ

- 7BEE の周波数選択方法
  - Band を 1 つ選ぶ (CO, EU, EL)
  - そのバンドの中で、2 つのラインを同時に記録できる (Spectral Window)

RFSoC 電波分光計



RealDigital RFSoC 4x2

SoC 内に、FPGA、CPU と共に

高速 ADC (5 GSa/s) が 4ch 使用可能

→ コストパフォーマンスに優れる電波分光計になり得る

計算リソースの制約により、5 GSa/s をリアルタイムで、科学目標に沿った周波数分解能で、分光できるのは 1 ch のみ

手法：時間ドメインで周波数分離する

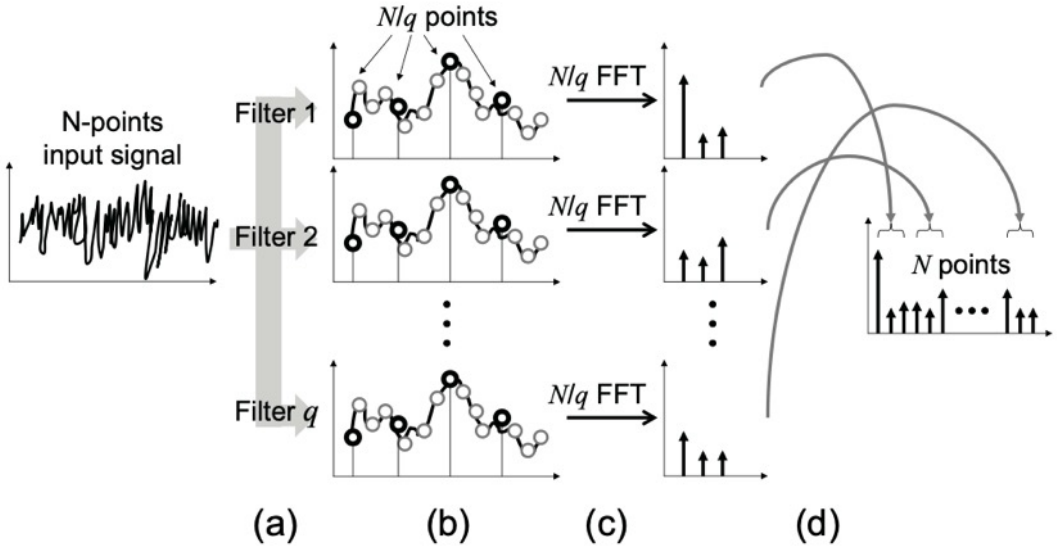
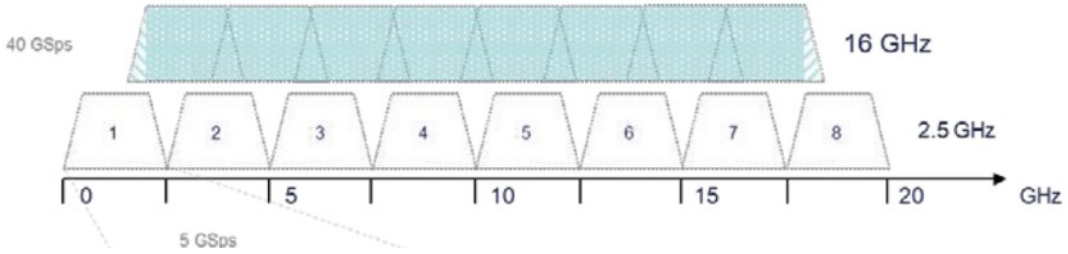


図 9　フィルタ・バンクを用いた $R2^k$FFT.

中原他 (2012) 第11回情報科学技術フォーラム, RC-005



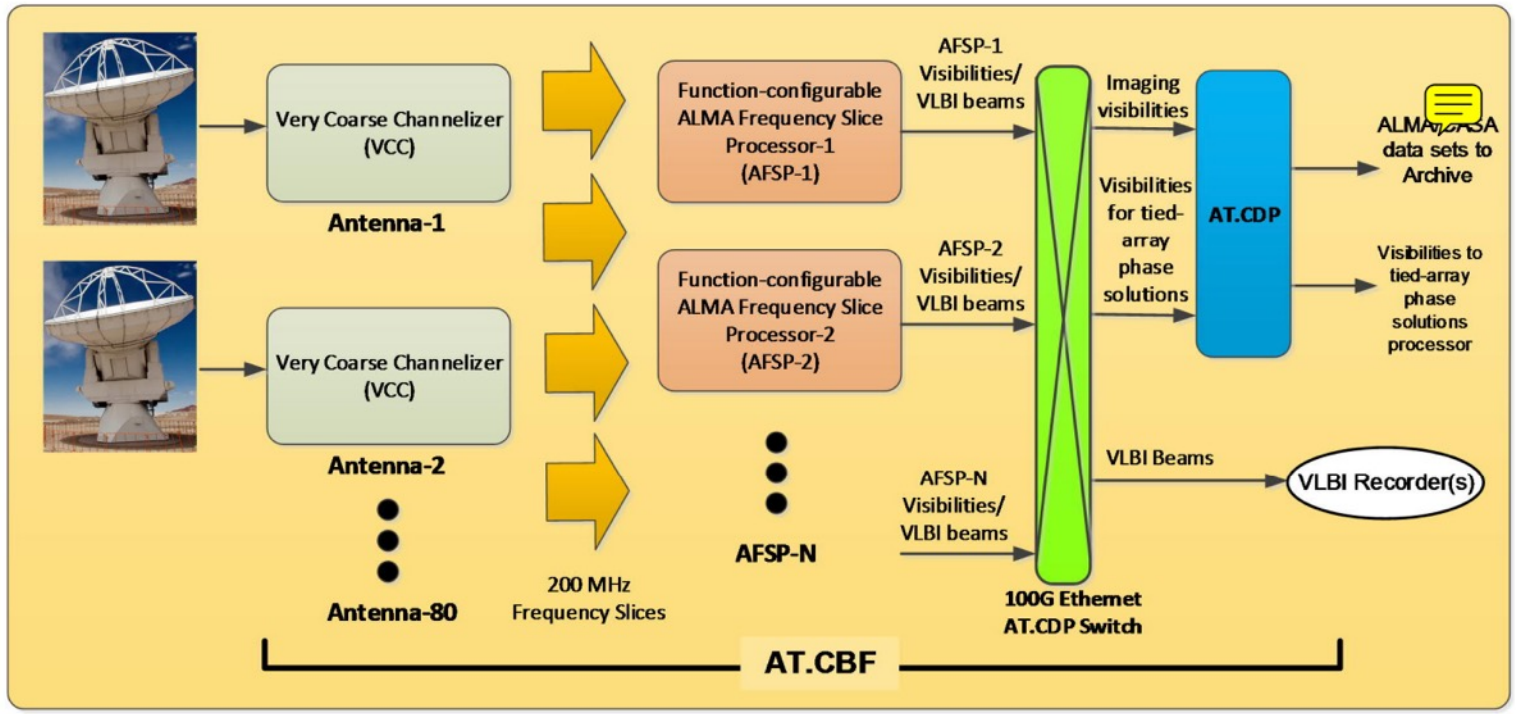
Quertier et al., (2021), ALMA Development Studies 2019

Polyphase Filter Bank (PFB) を用いたFFT演算コスト低減手法

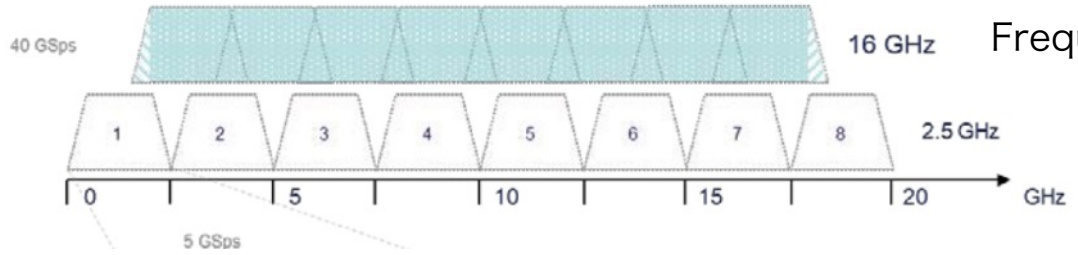
- 入力信号を分配し、
- それぞれデジタルフィルタをかける
- その後、データ点を間引き、FFT する
  - エイリアシングを使ってFFT
- 最後にデータを連結する

- 計算コスト
  - N log N から、N log(N/M) になる
  - N : 分光点数、M : PFB 分割数

(参考) ALMA2 相関器： ATAC



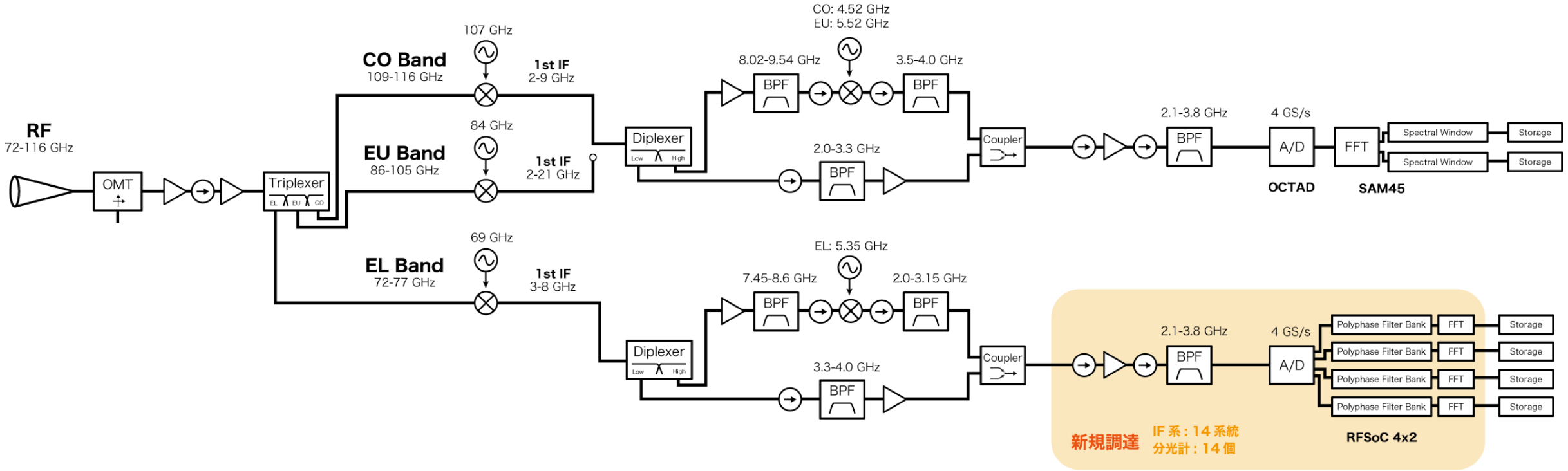
Carlson et al., (2020), ALMA Memo 617



Quertier et al., (2021), ALMA Development Studies 2019

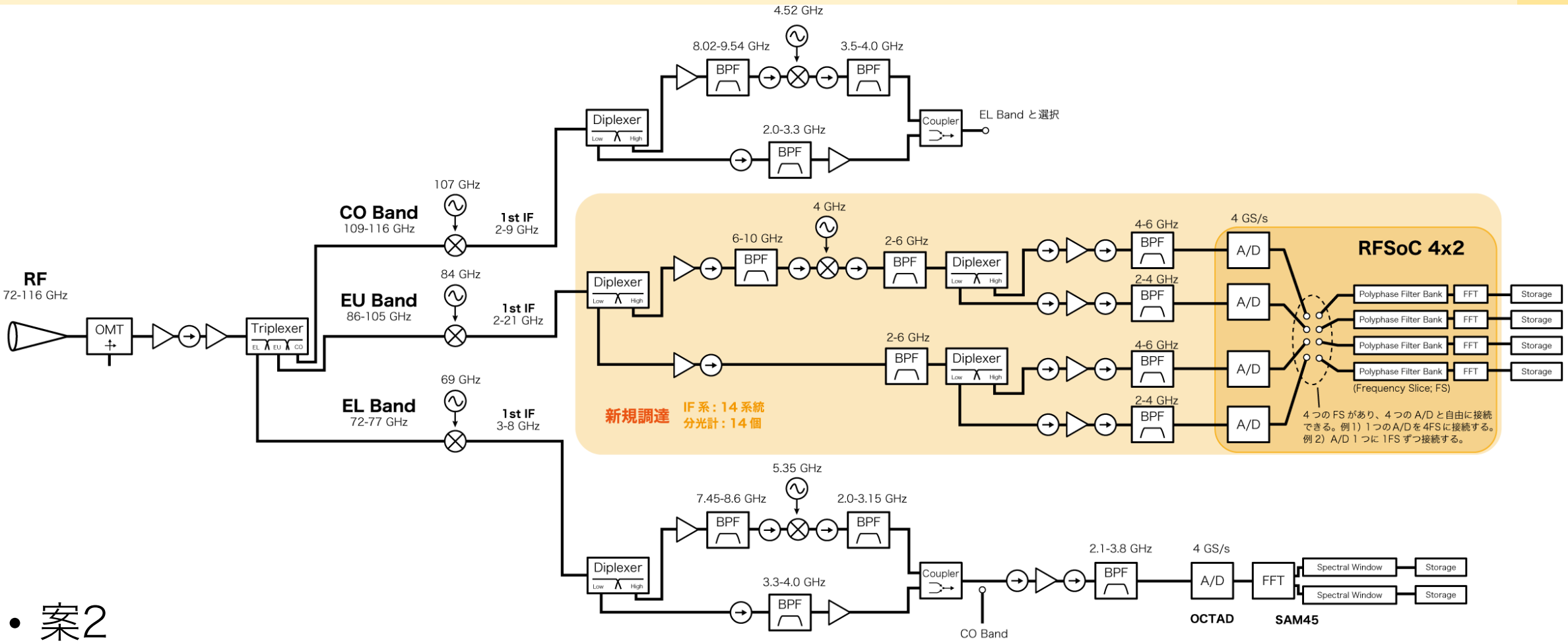
- アンテナからの 40 GSa/s データを PFB にて 200 MHz の Frequency Slice (FS) に分割 (1st-F)
- FS を FX 処理
- FFX タイプ
- 最後に、FS を結合して Spectral Window を作成

アップグレード案 1



- 案1
  - RFSoC 分光計 (1台で 4 Spectral Window相当) を、EL バンドに導入する
  - EL の 4 輝線 (DCO+, DCN, DNC, N2D+) は常時観測できる
  - SAM45 は、COバンドまたはEUバンドに接続し、2輝線を追加で記録する
  - 新規に必要な IF 系が簡素ですむ

アップグレード案 2



- 案2
  - RFSoC 分光計 (1台で 4 Spectral Window相当、A/D と FS の接続は自由に設定できる) を EU に導入
  - EU バンドの任意の 4 輝線を常時記録する。FS数4は暫定値。8くらいまでいけるかもしれない。
  - SAM45 を、COバンド、ELバンドに接続し、2輝線を追加で記録する。
  - 周波数分解能は可変にし、0.1km/s 相当 (df=30kHz, BW=62MHz) を基本性能で作る。高分解能モードも追加で整備したい

推進体制・計画

マンパワー
- 西村 淳 (国立天文台)
- 松本 健 (大阪公立大学; D3)
- 福間 耀 (名古屋大学; B4)
- 募集中です！

予算計画
- 国立天文台 リーダーシップ経費
  - 実験用ボードを購入し試作を開発した
- 科研費 基盤(A)
  - 代表：大西利和 (大阪公立大学)
  - 実験環境の整備など
- 申請中：科研費 学術変革
  - 領域代表：富田賢吾 (東北大学)
  - 研究代表：徳田一起 (九州大学)
  - 7BEE アップグレード用の RF SoC、IF系の調達

設置場所
- 下部機器室内、7BEE の横の空きスペース

撤退計画
- 7BEE デコミッションと同時に廃止

計画
- 予算獲得前
  - デザイン・実装・性能測定 (1 FS)
  - 4 FS のデザイン
  - FS を何個まで増やせるか
- 予算獲得後
  - 1年度目
    - 分光計の量産、性能評価
    - IF 系の量産
  - 2年度目
    - 分光計・IF系の量産完了
  - 3年度目以降
    - 科学利用