

VLBI相関器の開発

エレックス工業(株) 小関研介

2014/06/03

川口則幸教授退任記念ワークショップ



VLBI相関器の変遷

開発	名称	速度	ラグ数	相関部	データ伝送
1983	K3相関器	8Mbps	8Lag	汎用 ロジックIC	ECL
1991	簡易型相関器	128Mbps	512Lag	ASIC	ECL
1994	NRFD	256Mbps	4096Lag	ASIC	ECL
2001	光結合相関器	2048Mbps	256Lag	ASIC	LVDS
2005	光結合相関器 (FX)	2048Mbps	16kCH	FPGA	LVDS
2009	KJJVC	8192Mbps	256kCh	FPGA	LVDS/光伝送

K3相関器

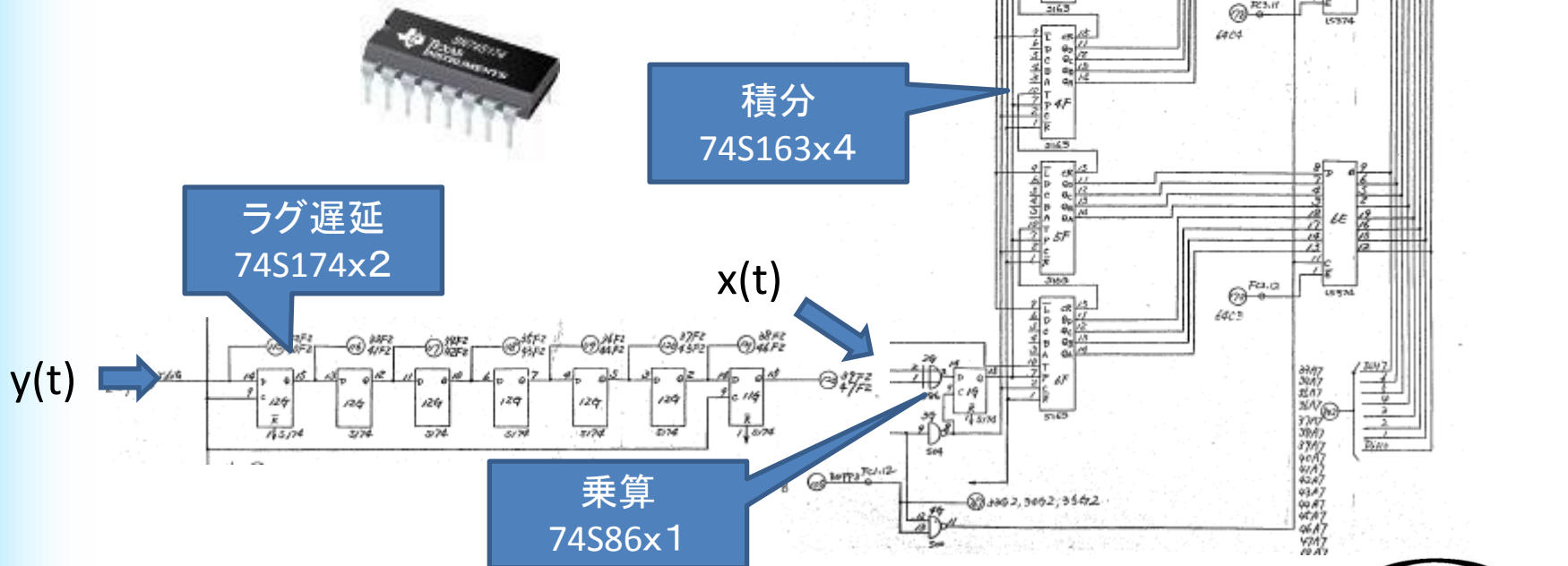


方式	XF
速度	8Mbps
ラグ数	8ラグ
局数	2局
基線数	1基線

K3相関器

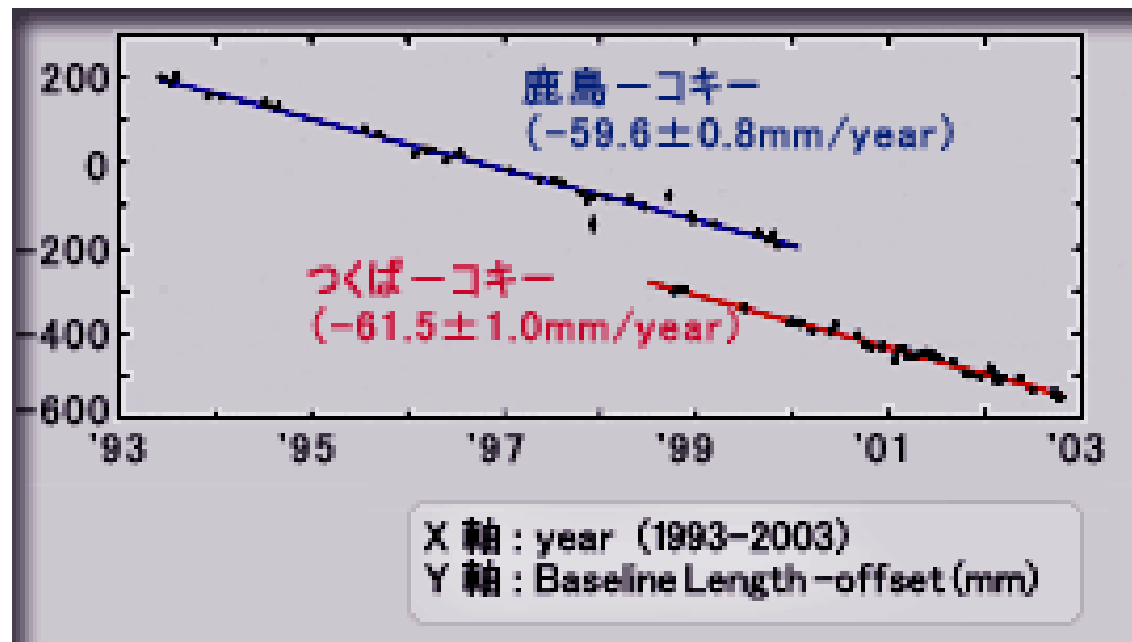
- すべて汎用ロジックICで構成
 - フリップフロップを7個並べて8ラグ
 - 4bitカウンタを6個並べて1ラグの積分

$$C_{xy}(\tau) = \int x(t) \cdot y(t-\tau) dt$$



K3相関器

- 歴史的な装置
 - 電波天文との出会い
 - プレート運動の実証



NAOCO(簡易型相関器)



方式	XF
速度	128Mbps
ラグ数	512ラグ
局数	2局
基線数	1基線

NAOCO(簡易型相関器)

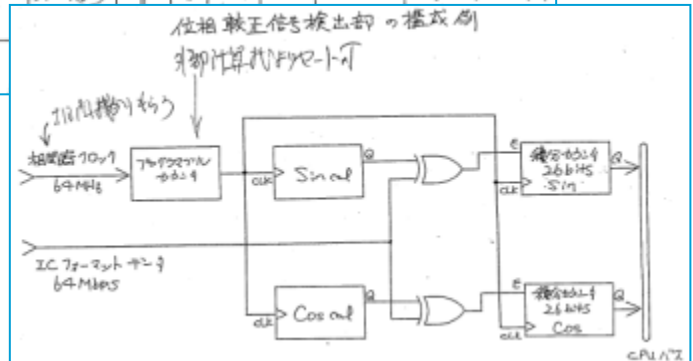
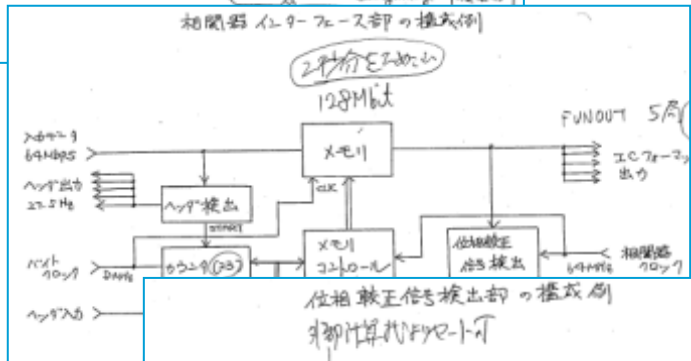
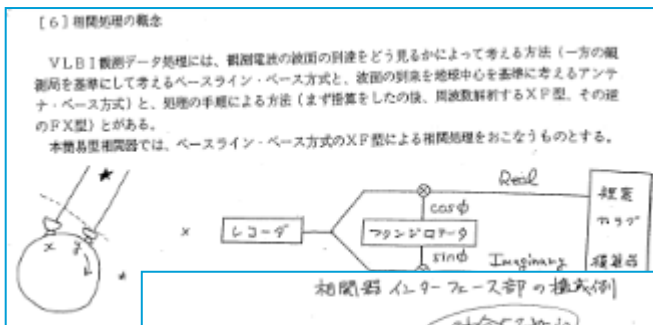
- 説明会資料

- 70ページの資料(原理、アーキテクチャ、回路構成・・・)

簡易型相関器仕様説明会 (FAX 63)

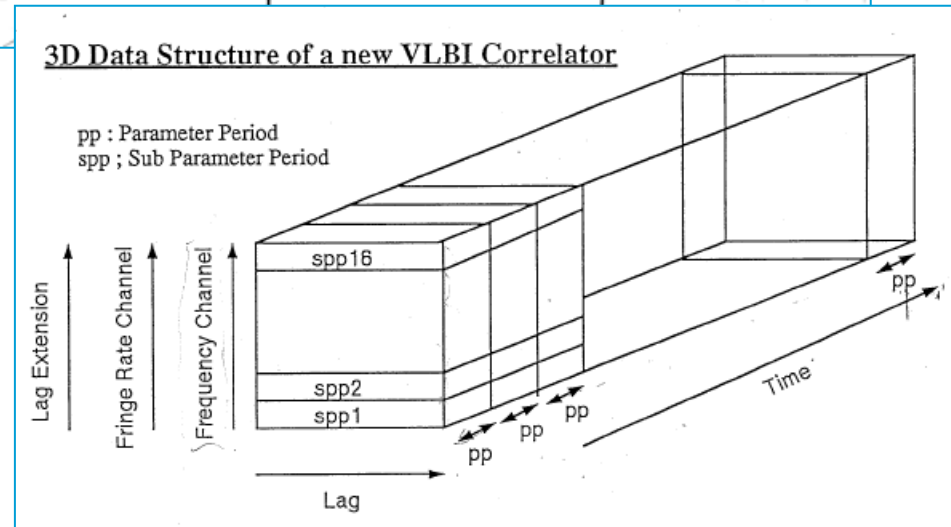
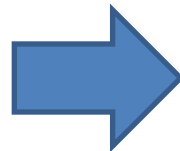
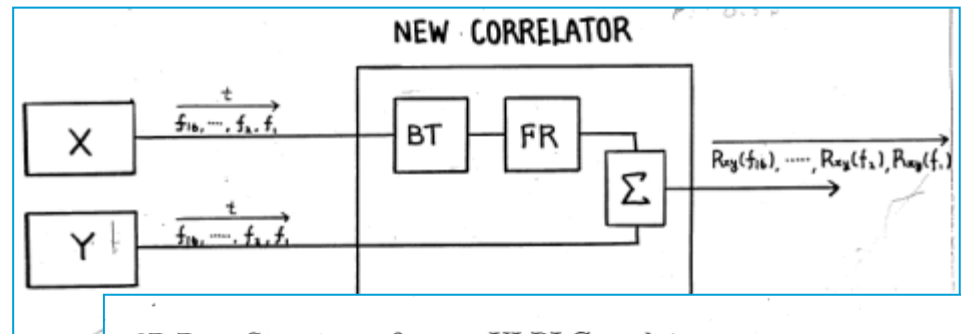
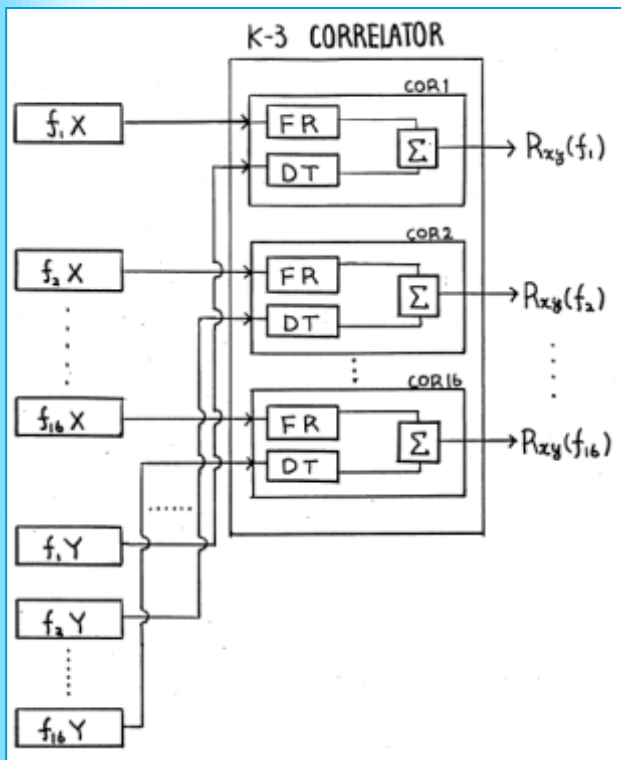
1990年4月12日
国立天文台 水沢

- [0] あいさつ
- [1] 開発スケジュール
- [2] パロポータルについて
- [3] 概説
- [4] VLBIの基本測定原理
- [5] 本装置の開発目標
- [6] 相関処理の概念
- [7] 相関器性能諸元
- [8] システム構成
- [9] 相関器インターフェース部の仕様
- [10] Mark-Ⅲ再生アダプタの仕様
- [11] 相関機分部の仕様
- [12] 制御計算機、ソフトウェア構成(参考)



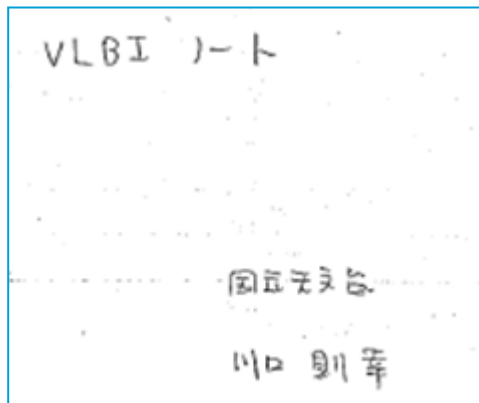
NAOCO (簡易型相関器)

- 新しいアーキテクチャ
 - シリアライズ型多チャンネル相関
 - その後、KJVCでも採用



NAOCO (簡易型相関器)

- 初めて担当した装置
 - 何も知らずに
- 水沢での打合せ
 - 数式とハードウェア
- 相関処理のイロハから
 - VLBI技術ノート
 - 特別講義



VLBI

$$y(t) = x(t - \tau_g)$$

$$Y(\omega) = \underbrace{X(\omega)}_{\text{遅延波}} e^{-j\omega\tau_g}$$

$$S_{xy}(\omega) = X(\omega) Y^*(\omega) = X(\omega) X^*(\omega) e^{j\omega\tau_g}$$

100% 正相

→ 相関係数内の F 変換

実数
X に起因する遅延は 0 とし

フリンジ回転 ← 地球自転の影響 → トップノット

$$\tau_g = \tau_{g0} + \tau_g(t)$$

赤緯経緯の時間変化...

フーリエ変換公式

$$x(t) \leftrightarrow X(\omega)$$

$$x(t - \tau) \leftrightarrow X(\omega) e^{-j\omega\tau} \quad \text{シフト}$$

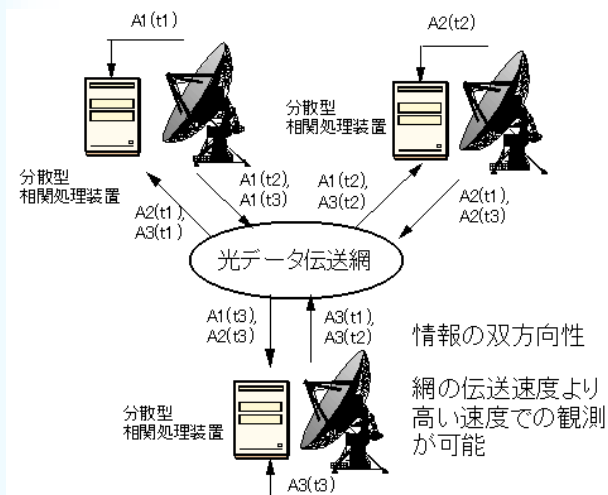
$$x(at) \leftrightarrow \frac{1}{|a|} X\left(\frac{\omega}{a}\right) \quad \text{マルチ
時間の拡大縮小}$$

光結合相関器



方式	XF(その後FX)
速度	2048Mbps
ラグ数	256ラグ (その後16KCH)
局数	3局
基線数	3基線

光結合相関器



- 光結合VLBI構想

- 光通信技術のとりこみ

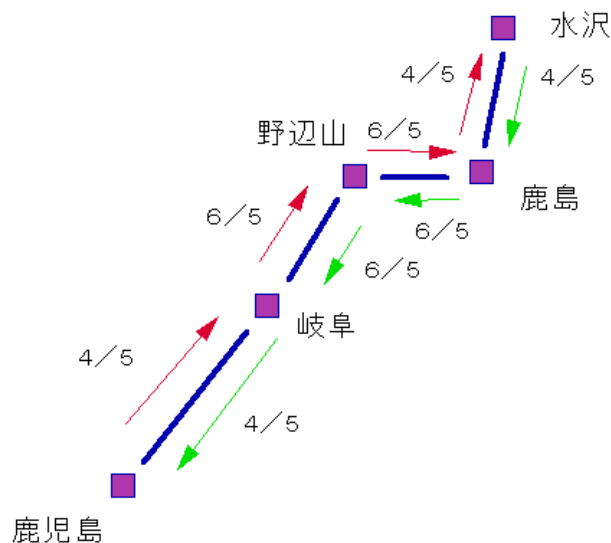
- SDH方式

- 2.4Gbps光伝送

- 情報系高速ネットワークの有効利用

- 双方向通信

- リアルタイム相関処理



光結合相関器

- 待ち受けVLBI観測
 - 2002年12月
 - 筑波・臼田の望遠鏡の休日を利用
 - リアルタイム相関処理の特徴を生かした観測
 - 星が望遠鏡の視野を横切る様子が目前に！！



KJJVC(東アジア相関器)



方式	FX
速度	8192Mbps
CH数	256Kch
局数	16局
基線数	120基線

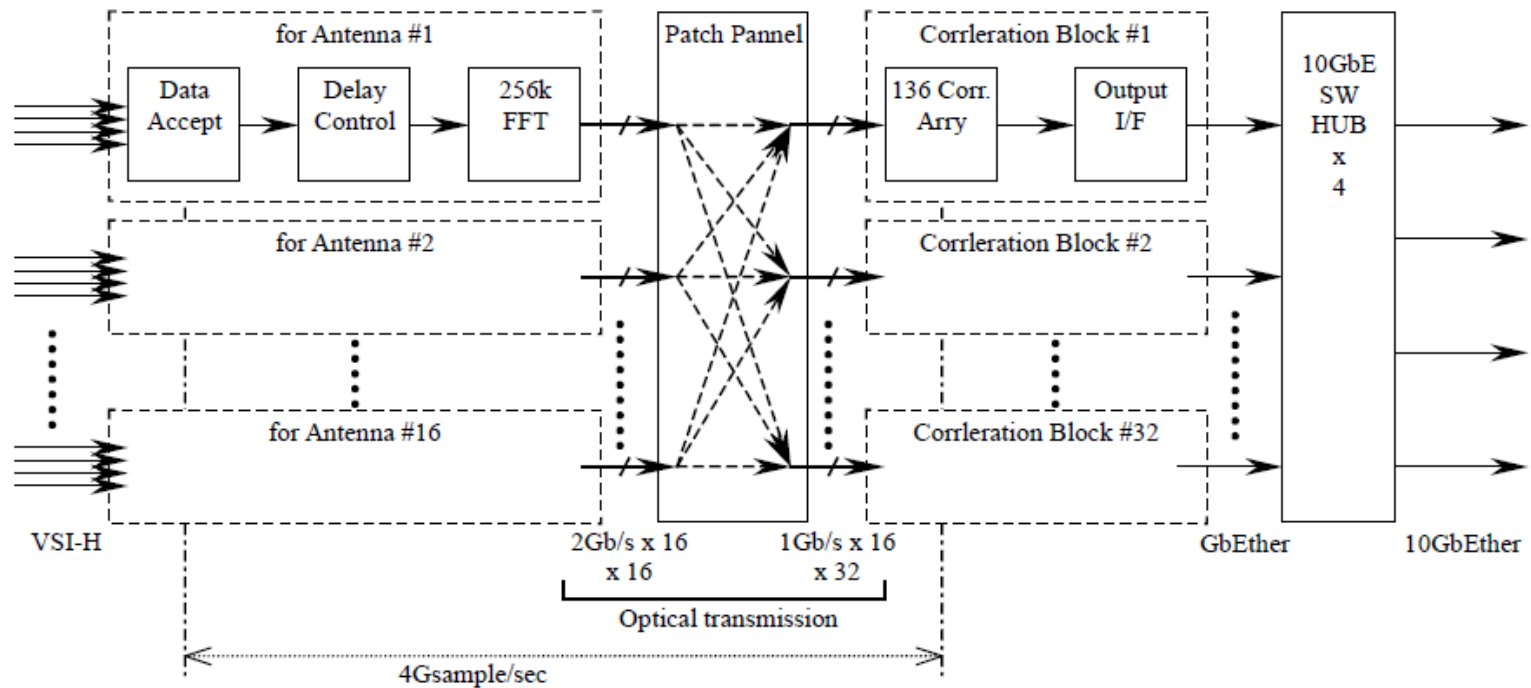
KJJVC



- 日韓共同の相関器
 - 天文台殿の強力なサポートで実現
- 新しいテクノロジー
 - すべて大規模FPGA
 - FPGA内臓DSP
 - ユニット間光伝送
 - 8Gbpsの能力を巡回利用することでウィンドウ拡張

KJJVC

- XFからFXへ
 - 初めての大規模なFX相関器の開発
 - 周波数領域での検証の難しさを実感



KJJVC

- 相関処理の原理

- FX相関器での不具合調査で相関処理の原理に直面
- 理解してみると分かりやすいFX相関器

The image contains handwritten mathematical derivations and diagrams related to cross-correlation processing. The left page shows time-domain waveforms $x(t)$ and $y(t)$ with their Fourier transforms $X(\omega)$ and $Y(\omega)$. It includes the cross-correlation function $R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) y(t-\tau) dt$ and its Fourier transform $S_{xy}(\omega) = X(\omega) Y^*(\omega)$. The right page shows the derivation of the cross-spectrum $S_{xy}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$ and the relationship between the cross-spectrum and the cross-correlation function. It also includes a plot of the cross-spectrum $S_{xy}(\omega)$ versus ω .

その他の装置たち



- 時系制御装置
 - VSOP関連器の裏方
 - 32MHzへの挑戦

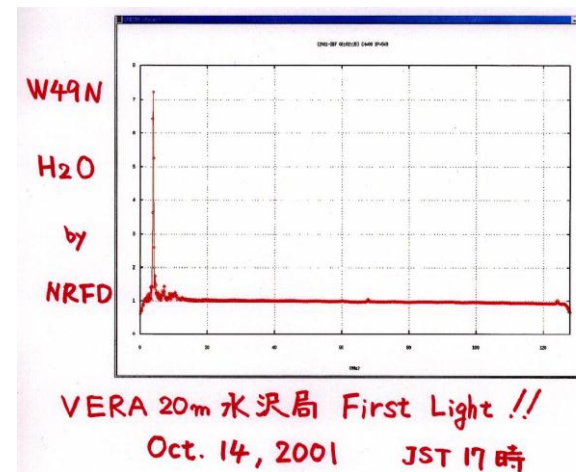


- バーストメモリ装置
 - 4Gbyteのメモリ
 - 捨てるメモリをタダで

その他の装置たち



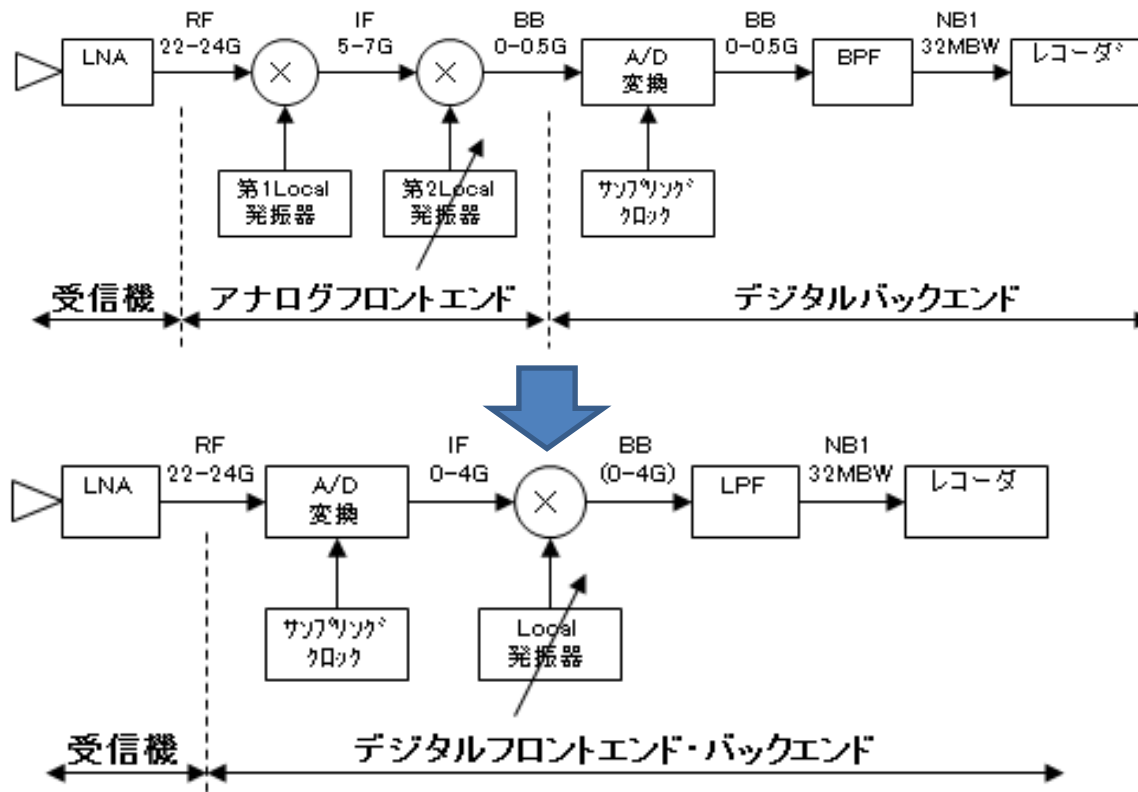
- VERAデジタルバックエンド
 - トータルシステムの開発
 - デジタルフィルタの導入
 - ASICからFPGAへ
 - ファーストライト



新しいVLBIシステムへ

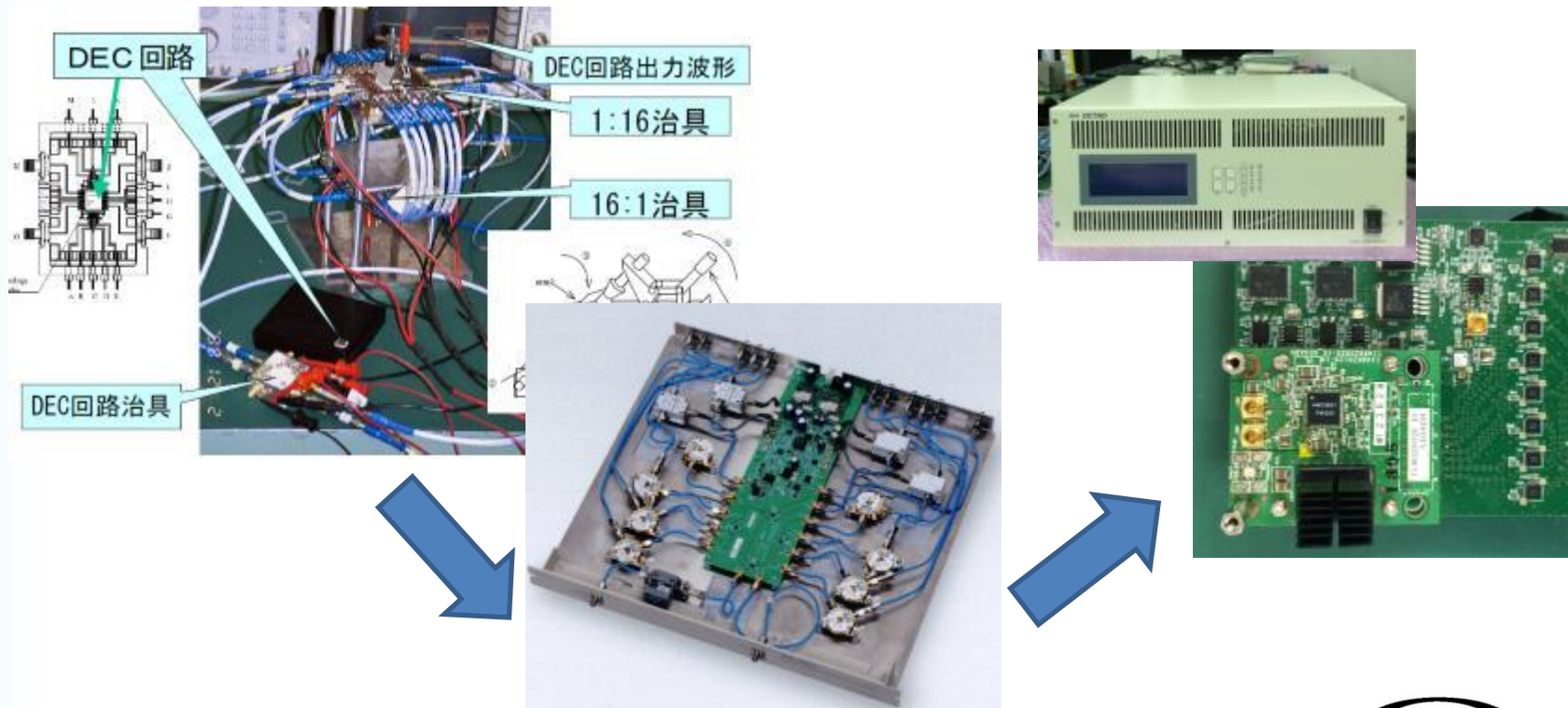
- ダイレクトサンプリング

- ダイレクトサンプリングとDBBCによるデジタルフロントエンドの実現



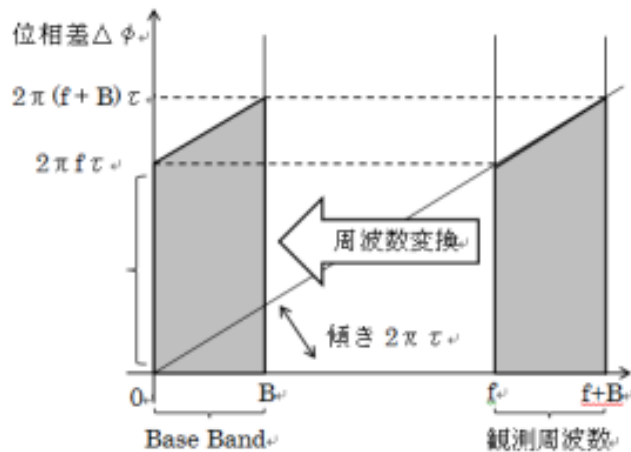
新しいVLBIシステムへ

- ダイレクトサンプラ OCTADの開発
 - バラックでのAD変換素子の研究から
 - モジュール化、基板化
 - DBBCの実装



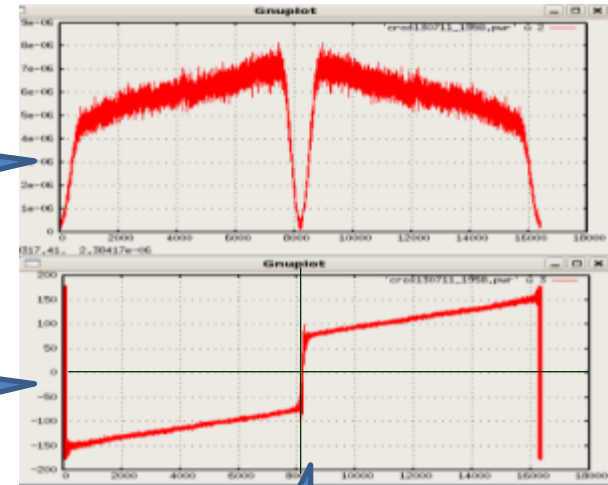
新しいVLBIシステムへ

- OCTADの相互相関試験
 - DBBCで見た初めてのRF位相
 - 教科書で見た周波数変換を実感



強度

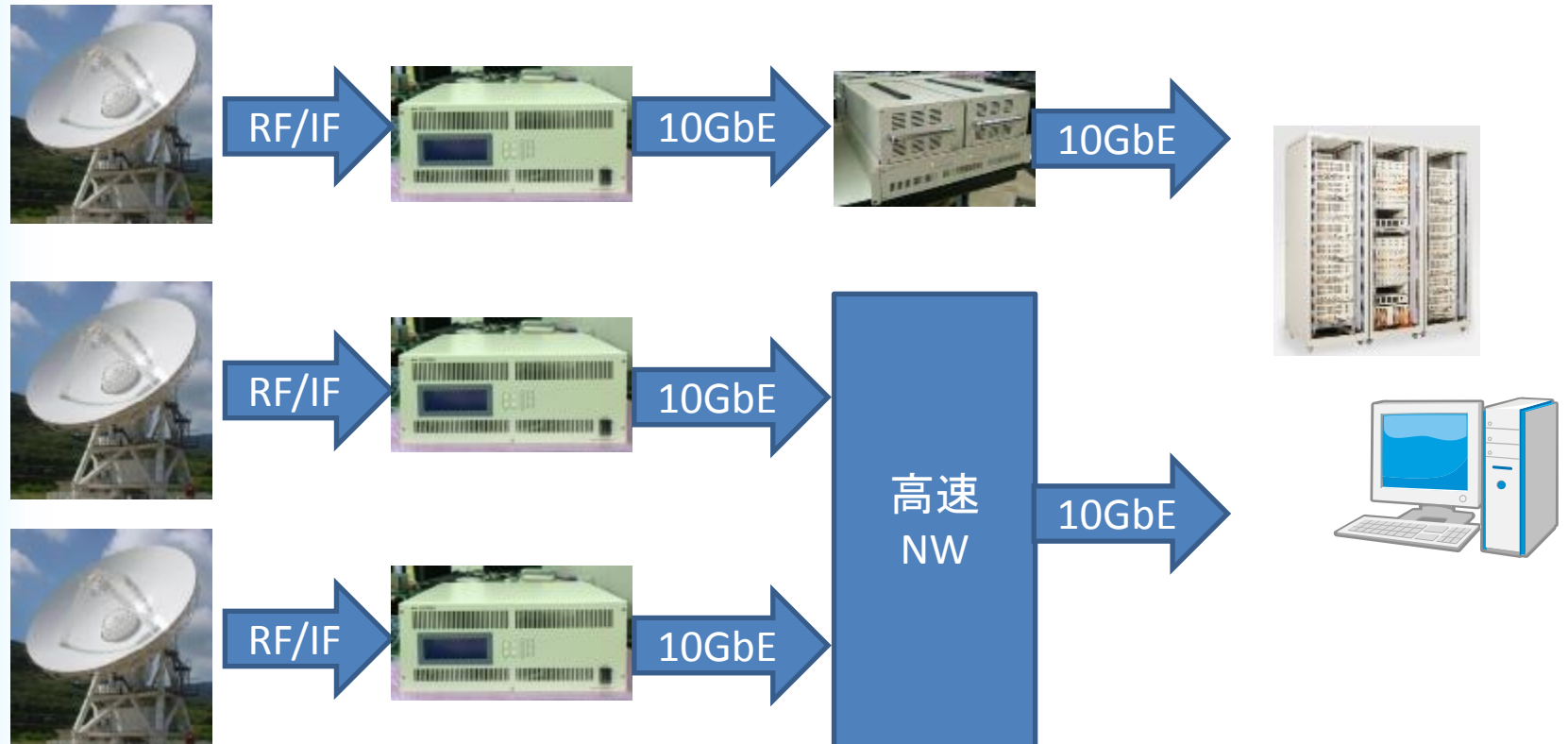
位相



DC

新しいVLBIシステムへ

- 光結合ネットワークVLBI
 - サンプラから相関器までを10GbEで光結合した柔軟なVLBI観測システムの完成へ



最後に

- 川口先生から頂いたもの
 - 知識とアイデア
 - チャレンジ精神
 - 感動
 - 技術者のつながり
- 本当にありがとうございました。

