

VLBIの周波数・時刻比較への応用

関戸 衛、岳藤一宏、氏原秀樹、Thomas Hobiger, 市川隆一、堤 正則



電磁波計測研究所
時空標準研究室
副室長
関戸 衛

Abstract

現在開発されている光周波数標準器は、周波数の確度(確からしさ)が $1.e-16$ の精度に近づきつつあり、近い将来現在のセシウムを使った原子時計にとって代わることが期待されています。その実現ためには、各国の研究機関で開発されている光周波数標準器の間で、精密な周波数の比較をおこなうことが重要です。次世代時空計測プロジェクトでは、VLBI技術を使って遠隔地の原子時計の周波数差を精密に比較することを目指しています。目標としている $1.e-16$ という精度は一般相対性理論の重力場による時間の遅れの効果が地上1mの高さの差で生じる大きさです($d\tau/dt = 1 - (g\Delta h + \frac{v^2}{2})/c^2$, $g = 9.8m/s^2$, $\Delta h = 1m$ で $1.e-16$ の周波数差)。空間的な位置の測定も周波数標準器の周波数を比較する上では重要です。VLBIは地球の直径規模の距離を1cm以下の精度で計測することができるため、これまで測地VLBIとして地球上及び天球上の基準座標系の構築に貢献してきました。今度は、新しいVLBI技術を使って遠隔地の周波数標準器の周波数差を $1.e-16$ 以下の精度で測定することを目指しています。

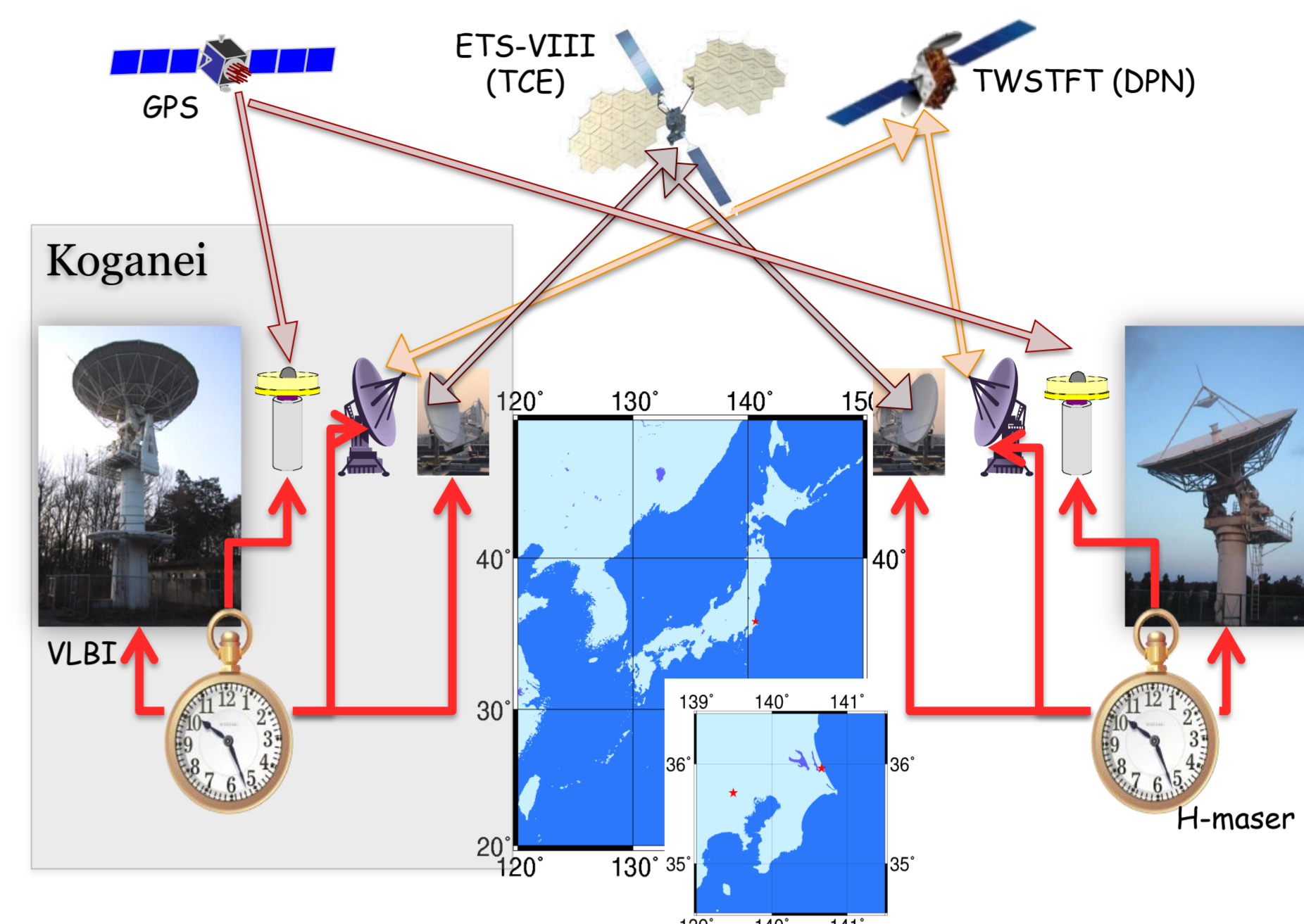


図1 遠隔地の周波数標準器の周波数比較技術としては、GPS,衛星双方向、VLBIなどがあります。

1. 小型・高感度VLBIシステム(GALA-V)の開発方針

周波数標準器を開発している研究機関の間でのVLBI技術による周波数比較を実用化するためには小型で移設可能なシステムが必要です。一方、携帯電話の電波より16桁程度も弱い微弱な天体の電波を受信するためには、観測システムは極めて高い感度を要求されます。この矛盾する要求を実現するため、大型アンテナと小型アンテナを組み合わせた観測システムを検討しています(図2)。

VLBI観測の信号対雑音比(SNR)は以下の(1)式で表され、アンテナ直径(D)、受信機・システム雑音温度(T_{sys})、アンテナ開口効率(η)、受信帯域幅(B)、積分時間(T)の関数です。またVLBIの観測量である遅延時間は(2)式のように、SNRと(有効)帯域幅に反比例します。

$$SNR \propto SD_1 D_2 \sqrt{\frac{\eta_1 \eta_2}{T_{sys1} T_{sys2}} BT} \dots (1) \quad \sigma_\tau \propto \frac{1}{SNR \cdot B_{eff}} \dots (2)$$

小型アンテナの弱点を補い、これまでのVLBIより1桁高い遅延計測精度を実現するため、観測帯域を3GHz~14GHzの広い帯域を対象として、1GHz帯域幅4バンド、両偏波を取得するシステム(32Gbps)を設計しています。 **岳藤さんの発表参照**

従来2GHz・8GHzの周波数帯域を1偏波16MHz程度の帯域幅で16バンド取得(512Mbps)していた方法に比べて、データ取得量が64倍、有効帯域幅を10倍に拡大する野心的な計画です。これは次世代のVLBI観測技術仕様として国際VLBI事業において提案されているVLBI2010という仕様に沿ったものであり、この仕様のアンテナの建設が日本の国土地理院やドイツ、スペインで既に始まっています。これら国内外の観測局との共同観測も視野にいれています。



図2 小型VLBIシステムの1.6mアンテナ(左)と鹿島34mアンテナ(右)。小型と大型のアンテナの組み合わせにより受信感度を向上させる。

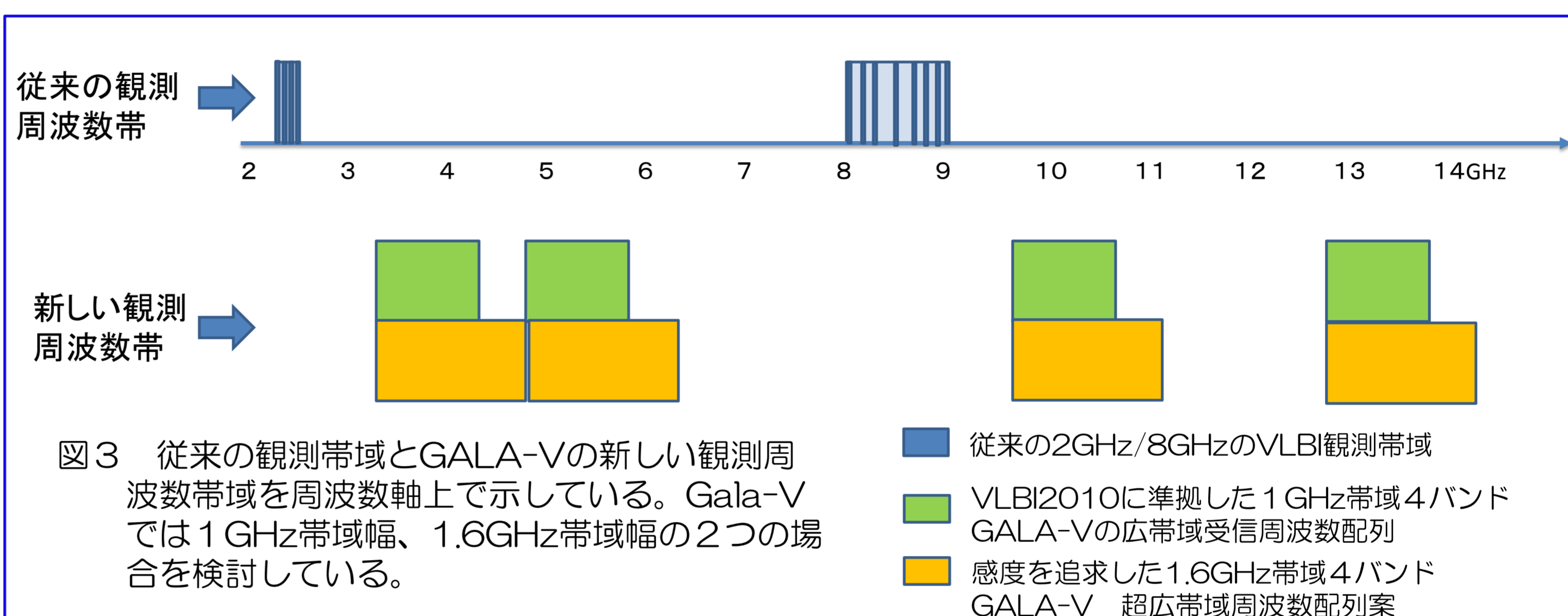


図3 従来の観測帯域とGALA-Vの新しい観測周波数帯域を周波数軸上で示している。Gala-Vでは1GHz帯域幅、1.6GHz帯域幅の2つの場合を検討している。

2. 研究開発課題へのチャレンジ

2.1 広帯域な観測周波数の選択=干渉電波問題と最良の遅延計測精度

広帯域の観測を行う準備として、環境電波の強度を計測し、観測周波数帯域を決定しました(図3)。実際に鹿島で観測された周波数スペクトル(図4)には通信やレーダなどで使用されている信号が確認されます。受信機が飽和しないように配慮しながらフィルタでこれらの干渉電波を除去する予定であり、3~14GHzの周波数の中から遅延計測に最適となる観測周波数帯域を選択しました。これは周波数間隔1.6GHzの零冗長配列と呼ばれる配列で、遅延時間の計測において遅延分解関数のサイドローブが最小となります。また、ダイレクトサンプリング技術を使えば、周波数変換器を省略したデータ取得系を実現できる可能性があります。 **岳藤さんの発表参照**

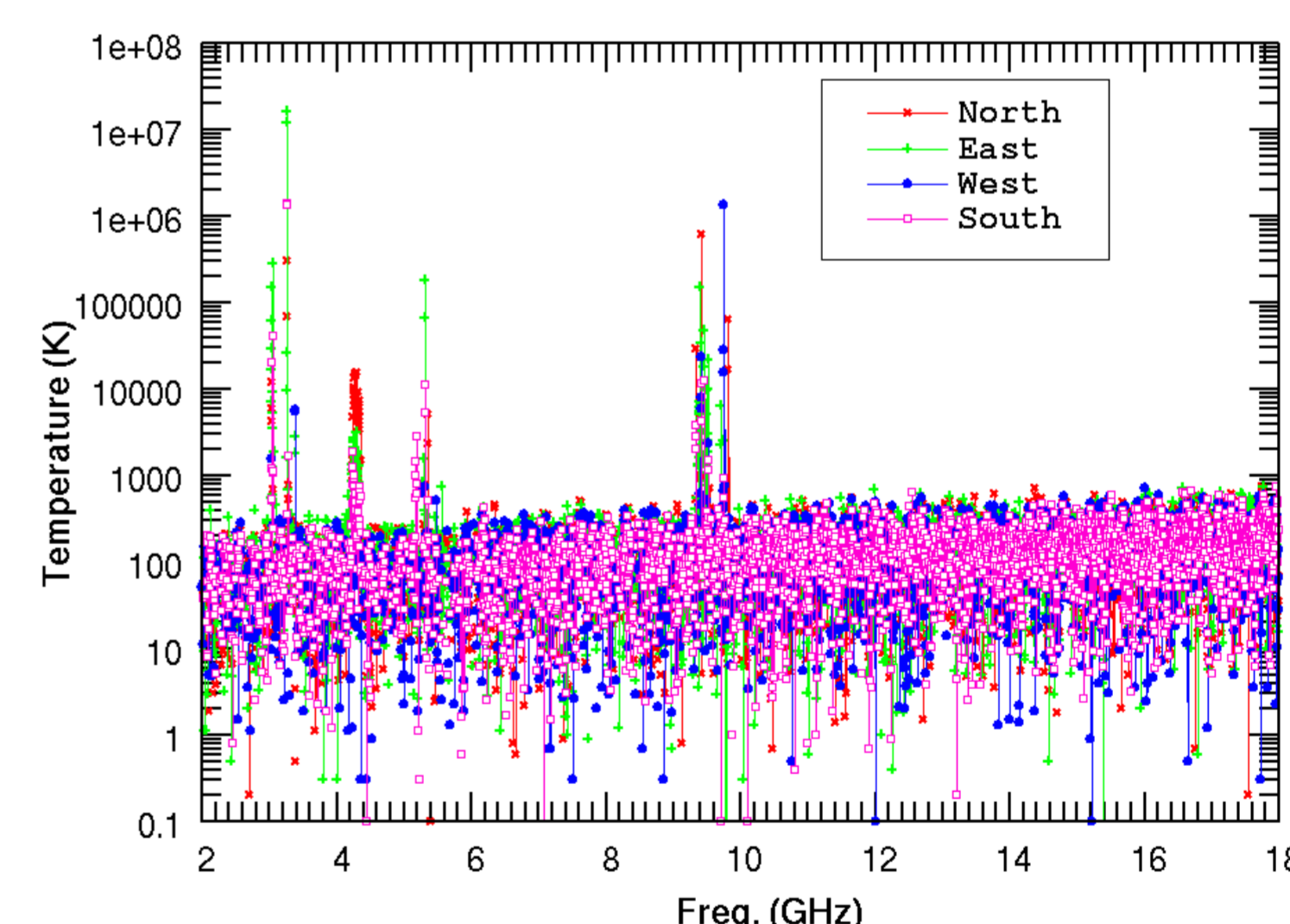


図4 広帯域受信機で調査した鹿島の電波環境。

2.3 広帯域受信機の開発

広い帯域で高い開口効率と一様な受信感度・指向性を持つアンテナを作ることは大変難しい技術です。3GHz~14GHzの全てでなく、特定の周波数帯域に高い感度を持つアンテナは、それよりは少し難易度が緩和されます。中期計画の中で確実な成果を上げるために、電磁界シミュレーションを駆使して図3の周波数配列を持つアンテナ(図5)の開発に取り組んでいます。 **氏原さんの発表参照**

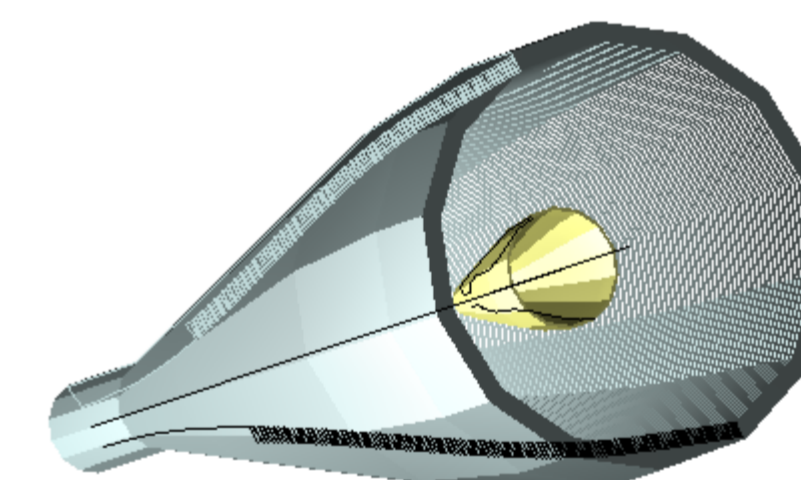


図5 34mアンテナに搭載する計画で設計・検討している広帯域フィードのイメージ。高周波と低周波のフィードが入れ子になっている。

2.2 大容量データ処理技術の開発

観測帯域を拡大することで、データ量は従来(256~512Mbps)の50~60倍(16~25.6Gbps)に増加し、1日の観測1回の1局当たりのデータ量は50TB以上になります。データ処理では、直線偏波2偏波(V,H)のすべての組み合わせ(VV,VH,HV,HH)で処理を行う必要があり、データ処理量は、従来の200倍にもなります。このような大容量のデータ処理に対応するため、GPUなどの活用も含めた、分散型のソフトウェア関連処理システムの開発に取り組んでいます。

Hobigerさんの発表参照

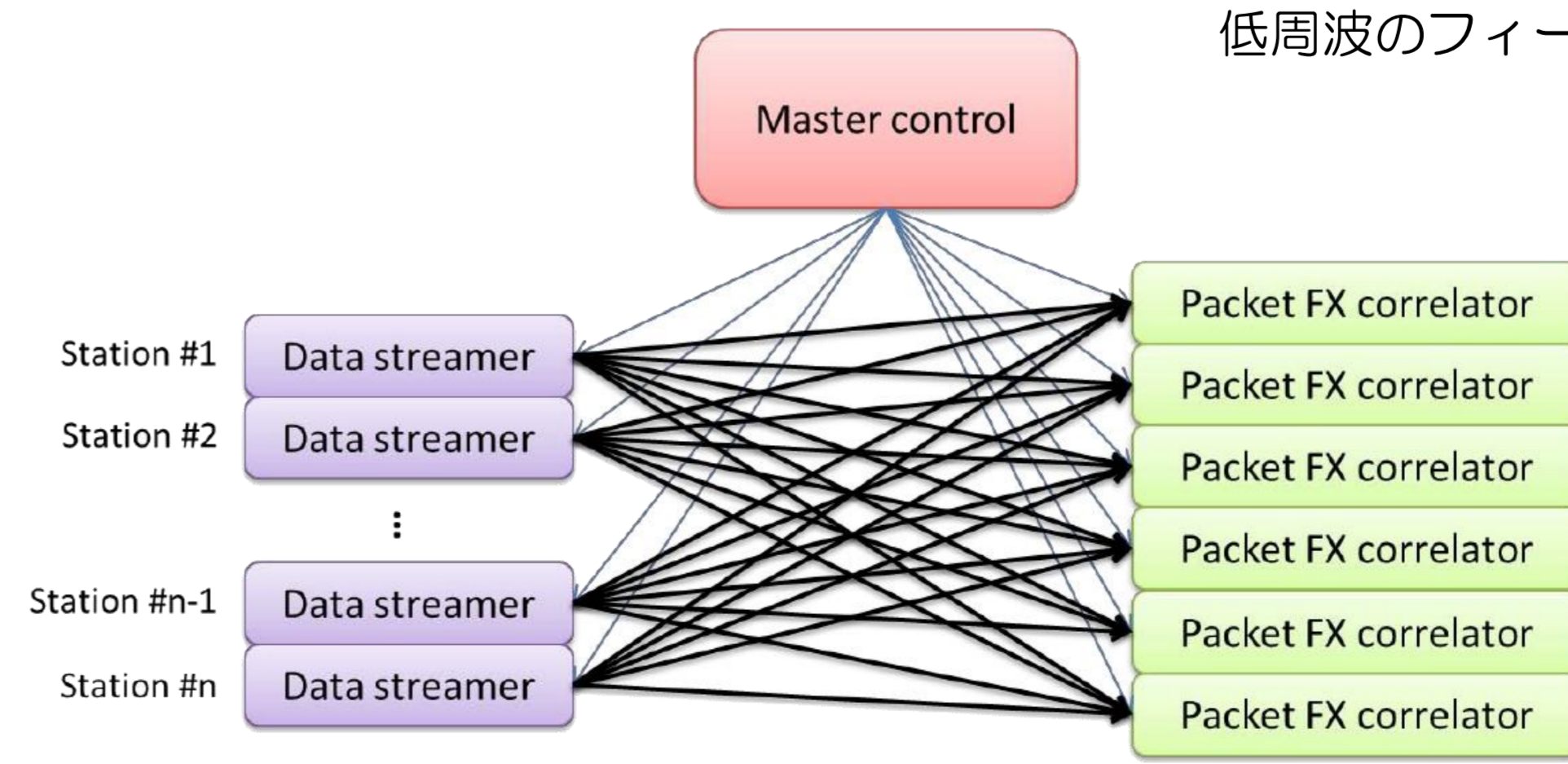


図6 新しいソフトウェア関連処理システム(KFC)の概念図。