

《ハイテクとおめがね事情(II)》

64 素子広視野電波

パトロールカメラ

—世界で初の直接像合成干渉計—

天の川に突然、強い電波天体が表れ数日間輝くことがある。はくちょう座のX線源 Cyg X-3 はその代表で、1972 年以来大電波バーストが繰り返し観測されている。このような天体を効率よく捜すために、広視野電波パトロールカメラを建設した。これを用いて、世界ではじめてナイキストレートで電波像を得ることに成功した。ガンマ線クェーサーを始め、活動銀河核 (AGN) の観測も行っている。この装置の手掛ける天体物理、信号処理の原理、について概観する。

トランジェント電波源

ガンマ線観測衛星 GRO など観測されている γ 線源の内のあるものは、電波バーストを起こす。これらトランジェント電波源からは、相対論的速度のプラズマ雲がジェット状に吹き出していて、中には GRS 1915+105 のように、固有運動 (天球面上の動き = 角速度) \times 距離から求めた横向き速度が “超光速” を示すものもある。

まれにしかバーストを起こさないトランジェント電波源を、空の 1 方向しか観測できない従来の電波望遠鏡で捜すのは簡単ではない。早稲田大学では、広い視野をもち多数の方向を同時に観測して、高い感度でこれらの天体を効率よくサーベイできる装置の開発を、1979 年から始めた。8 素子 1 次元の試作機を手始めに、デジタル化、2 次元化、大型化と進め、直径 2.4 m のパラボラ 64 台からなる、直接像合成干渉計が誕生した。観測周波数は 10.6 GHz、全開口面積は直径 20 m のパラボラに等しく、同時に 64 方向を観測できるので、

サーベイ感度は直径 20 m のパラボラ 64 台分に相当する。あるいは、観測時間で 64 倍かせげるとか、帯域が 64 倍に広がった、といってもよい。これらは S/N 向上にとって等価である。

電波干渉計の歴史

電磁波の振幅をフーリエ変換する早大の方式は、パワーをフーリエ合成する従来の干渉計とは違う。

ミルスクロス

初期には、ミルスクロスのように等間隔にアンテナをならべ、1 本のペンシルビームを合成した。電波地図の作成は、各アンテナにつけた位相器を制御してビームを振って行く。このシリーズ第 8 回の京都大学 MU レーダーは、電波放射にこの原理を用いている。

間接像合成干渉計 (フーリエ合成干渉計)

次に登場したのがフーリエ合成干渉計である。現在の干渉計のほとんどは、このケンブリッジ大学が開発した方式であり、基本的に 2 素子干渉計の集合である。

2 素子干渉計の出力を考えてみよう。干渉計の基線長が長い (短い) と、細かい (粗い) 角度で繰り返す感度の干渉パターンが形成される。180 度の位相スイッチングを行えば、それと空の輝度分布のたたみこみ (コンボリューション) の差 (フリッジ) が出力される。フリッジの振幅は、空の輝度分布の凸凹のうち基線長に対応する角度周期の成分の大きさを与えるから、さまざまな基線長の 2 素子干渉計を用意して、必要なすべての角度周期の振幅を得れば、それらを用いて求める輝度分布が合成できる。

数学の言葉では、長い (短い) 基線長の組からは、空の輝度分布を正弦波に分解 (フーリエ分解) したときの高周波 (低周波) 成分が得られるという。この方式では、天体からの信号のある性質をたくみに利用する。熱雑音のパワーの時間平均はアンサンブル平均に一致する (エルゴード性) が、

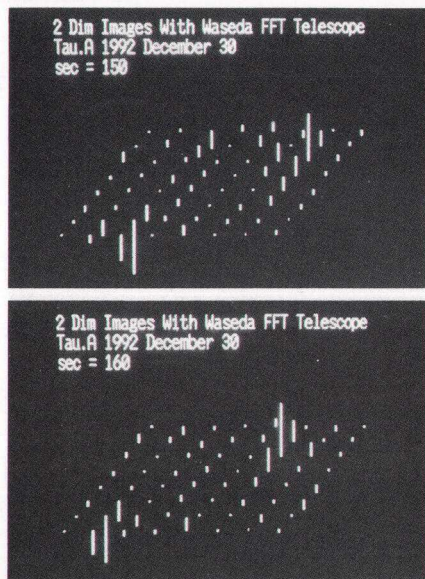


図1 64画素面を通過するかに星雲(乙部他94)

定常的な天体からの電波もこの性質をそなえている。この条件が満たされるときは、これらのフーリエ成分を同時にとる必要はない。アンテナを動かせば2素子であらゆる基線長をつくりだせるから、原理的には2台のアンテナでいくらかでも細かな電波地図をつくることのできる。

このようにフーリエ合成干渉計(間接像合成干渉計)は、少数のアンテナで、できるだけきめ細かな電波地図をつくることを目指して開発された。“冗長度最小”(同じ基線長の組を最少にする; minimum redundancy)という標語は、与えられたアンテナ数で画素数を最大にするという k 空間(運動量空間)での目標を、アンテナ配列面(フーリエ変換対の空間; uv 面)で表現したものである。

直接像合成干渉計

これまで、“冗長度最少”のフーリエ合成干渉計が最良の干渉計であるという、漠然とした通念があった。しかし、そこでとられているエルゴード性の仮定や画素数最大という戦略は、観測の条件に制限を加えることになる。例えばパルサーや通信の信号はエルゴード的ではないから、エルゴ-



写真1 64素子直接像合成干渉計

ード性の仮定を必要とするフーリエ合成干渉計で処理することはできない。またアンテナ配列については、アンテナ数が与えられたとき、画素数最大と画素当りの感度最高のトレードオフ(どちらを優先するか)から、“冗長度最少”と“冗長度最大”のどちらかを選択しなければならない。

早稲田大学が開発した直接像合成干渉計では、画素当りの感度を最大にすべく64台のアンテナを等間隔2次元に配列している。各アンテナからの複素振幅は、 $(2 \cdot \text{帯域})^{-1}$ ごとに(ナイキストレートで)空間的に2次元FFT処理され、(実数部)²+ (虚数部)²から64画素の像をつくる。このためエルゴード性の仮定は不要である。

非エルゴード性、画素当たりの最大感度

直接像合成干渉計がはじめて可能にしたこれらの特徴により、トランジェント電波源のサーベイに加え、パルサーの効率的サーベイ、宇宙背景輻射(CMB)の微小ゆらぎの観測、などへ新しいアプローチが可能になった。フーリエ合成干渉計を開発したケンブリッジ大学では、5 km干渉計を最短基線で用いたり、1~2 mのアンテナを密に並べるVSA (Very Small Array)を計画してCMBの観測を進めようとしている。それらが収束する“極限”が、直接像合成干渉計である。

大師堂経明(早稲田大学教育学部)