

広視野フェーズド・アレイ電波望遠鏡の試作 (I)

大師堂経明[†]・岡 律夫^{*}・大川 徹^{**}・丸山 忠^{*}
横山哲弘^{*}・長根 潔^{††}・平林 久^{††}

広い視野を持った電波望遠鏡ができれば、銀河の向う端で発生する光で見えない超新星もとらえることができる。変わった天体も見つかるだろう。こう考えて8素子の試作機を作った。これはその記録である。Iでは原理的なことを、IIでは実際的なことを中心に書こうと思う。

トランジェント電波源

天体現象の中で比較的まれにしか起らないが、天体物理学的には重要なものがある。例えば超新星は星の進化の総決算的現象で、極めて短時間のうちに重力、核力、回転、電磁場、粒子線等のエネルギーの間で変換が行われ、その時点を境として全く異った状態の物質が存在することになる。しかしこのようなまれな現象を一つの天体について観測するには、宇宙論的な時間を必要とするから現実的でない。代りに、多くの天体を観測して統計的に扱い、目的を達成することになる。そのためには広い視野の望遠鏡が必要で、ツウィッキー達が1930年代に超新星の観測を始めることができたのは、当時パロマーにシュミット・カメラが建設されたからであった。彼等の光学的観測結果の集積とその後の電波、X線の観測、及び理論の発達によって、超新星とその残骸、中性子星、宇宙線、重元素の合成といった広範囲の問題を数十年後の今日、統一的に論じることが可能となった。

現在、 γ 線バースト、X線バーストのようなまれではあるが特異な現象が、「はくちょう」を始めとする全天サーベイ用の衛星により次々発見されている。電波の領域では低周波でフレアー星からのバースト的な電波が以前から知られていたが、1972年にX線源 Cyg X-3 の大規模な電波バーストがカナダで観測された。マイクロ波で強いこと、10 Kpc もの距離にありながら全天で有数の明るさになること等から、フレアー星とは桁違いに大きな爆発であることが分る。その様子は銀河系内のミニクェーサーと呼ぶにふさわしい。図1は郵政省電波研・鹿島支所の26mアンテナでバーストをとらえたときの記録である。この天体はチリにかくれて光では見えないが、赤外線とX線で4.8時間の正弦的強度変化を示

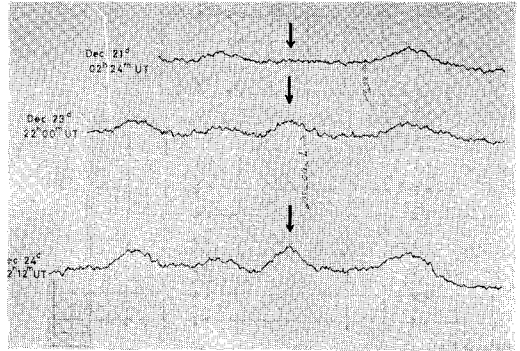


図1 Cyg X-3 の電波バースト。1973年12月21日に電波望遠鏡を向けたときには、矢印で示したCyg X-3の位置には電波源は無かった。アンテナは数分ごとに先回りして固定しておき、電波源がその前を通り過ぎると記録される。矢印の前後の山は銀河面にある定常的な強さの電波源である。2日後(日本時間ではクリスマス・イブの朝)に同じ場所を見ると強い電波源があった。数時間のうちに見る強度を増し、ピークに達した後は小規模なバーストを繰返しながら2週間で消えていった。下段の時刻はDec 24⁰²12^m UT。

している。大気チェレンコフ放射を利用した超高エネルギー γ 線($\sim 10^{12}$ eV)でも4.8時間の変動が認められ、3つのグループが独立に観測している。この他にCyr X-1やSS 433も、少し規模は小さいがトランジェント電波源である。またCOS-Bの発見した γ 線源CG 135+1のエラーボックス中にも、この種の天体LSI+61°303がある。最近では系外銀河に発生したばかりの若い超新星の電波がVLA等で受かるようになった。数年でその電波強度は落ちてしまうが、仮に我々の銀河系の向う端に出現したとすると最強の電波源Cas Aより強く受かる。

このようなトランジェント電波源は沢山あるに違いないが、年に1~2回のバーストの検出を多くの星について試みることはとてもできない(図2)。Cyg X-3等は、X線のふるいにかかったので注意深くモニターされて、比較的早く発見されたが、電波だけで明るくなる天体もきっとあるだろう。そこで広い視野を持ち、短時間に空の広い部分をマッピングできる電波望遠鏡が必要になる。

[†]早大教育 Tsuneaki Daishido; ^{*}日立コンピューター EG Ritsuo Oka, Tadashi Maruyama, Tetsuhiro Yokoyama; ^{**}富士通 Tohru Ohkawa; ^{††}東京天文台 Kiyoshi Nagane, Hisashi Hirabayashi: A Test Telescope for The Phased Array Telescope with Large Field of View (I)

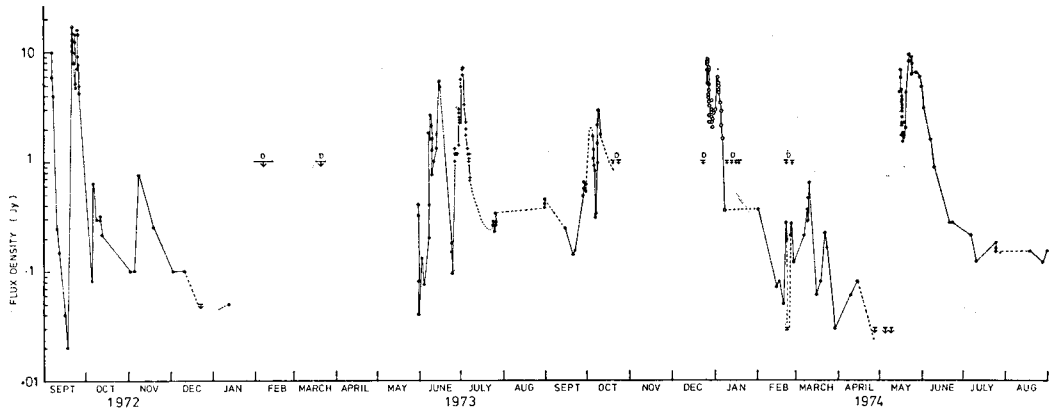


図 2 Cyg X-3 におけるバースト強度と発生頻度。縦軸は対数でとってある。↓ は上限値を示す (M. McEllin 1975, MN 170, 1)。

広視野フェーズド・アレイの概要

これまでの電波望遠鏡は高分解能を目指して発達してきた。例えば、その極限としての超長基線干渉計 (VLBI) では基線は大陸間にまで延長され、1/1000 秒角を超える高分解能が達成されるようになった。ところが、それに伴って視野は狭くなってしまい、通常天体はサーベの時以外まず観測されることは無くなってしまった。

広い視野と適度な分解能を得るためには、これまでの発達の歴史と逆のアプローチをとればよい。干渉計における視野と分解能の関係は次のようなものである。干渉計における各アレイ・アンテナの対からは天空の輝度分布のフーリエ成分が得られる。最短間隔からは最も低い空間周波数成分 (これが視野を決める) が、最大間隔か

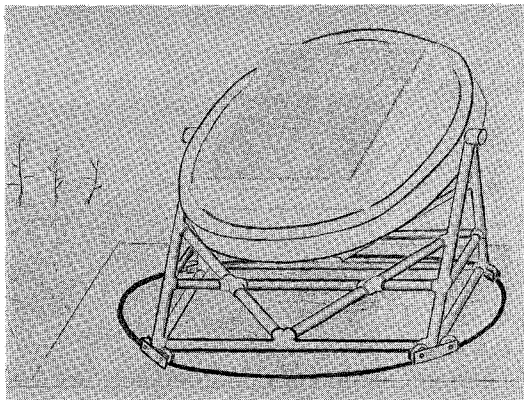


図 3 広視野フェーズド・アレイ型電波望遠鏡。64 × 64 = 4096 個のホーンアンテナを 2 次元に配列し、出力をフーリエ変換する。視野 9° × 9°、分解能 8′、1 週間で全天のサーベイができる。感度は 20 分間の積分で 200 mJy。開口面積 12.8 m × 12.8 m。周波数 10 GHz。バンド幅 50 ~ 100 MHz。

らは最も高い空間周波数成分 (これが分解能を決める) が得られる。従って視野を広くするためにはアレイ (素子アンテナの配列) の間隔を小さくし、個々の素子アンテナ自体も小さくすればよい。

実用機とするためには 20 cm × 16 cm のホーン・アンテナを図 3 のように 64 × 64 = 4096 個 2 次元に並べ (フィールド・アパチャー)、その出力を係数とするフーリエ変換を行う。現存するマイクロ波回路 (MIC) による GaAs FET 増幅器、ミキサを使用し、20 分間の積分で 200 mJy の感度を得ることができる。装置全体の開口面積は 12.8 m × 12.8 m で、1 つの点源に対する感度は、これだけの開口面積を持つ単一パラボラの場合にほぼ等しくなる。実用機では 9° × 9° の視野を 8′ の分解能でリアルタイムにマッピングできる。これは同一開口面積のパラボラ 4096 台が 8′ ずつ異なった方向を同時に見ているのと同じ能力を持つ。

2 次元のフーリエ変換はバトラー・マトリックスのようなアナログ方式と、A/D 変換後に高速フーリエ変換 (FFT) をデジタルに行う方法がある。調整、測定の手間を考えると、バトラー・マトリックスでは 1 次元の 64 系統だけについても 64 × 64 = 4096 通りの位相、振幅誤差を調整のたびに測定 (扱いにくい SMA コネクタをつないだり、はずしたりして) する必要がある。全体ではさらにその 64 × 2 倍の量になってしまう。我々がやると 1 系統の測定に 1 分間かかるので、全体の測定時間は 1 分 × 64² × 2 = 364 日 (眠らずに働いて、1 年! 元旦しか休めない。) となる。もちろんどちらの方式においても、実用機では診断用のポートをつけて、計算機による自動測定をするので心配はいらない。その場合でも、位相器のアナログ的な調整よりはシフトレジスタのビット調整の方がコントロールが楽であり、再現性に優れている。従って現状では少し遅くてもデジタル方式が楽

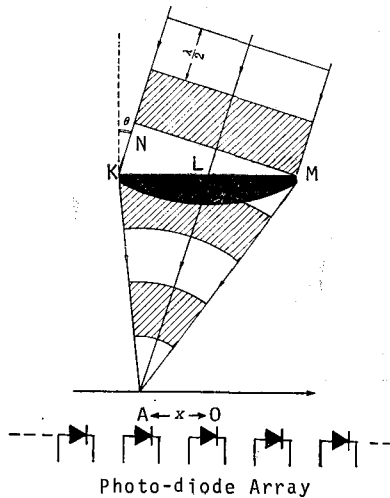


図 4 レンズによる結像。開口面に入ってきた波の到来方向ごとに仕分けて、方向の関数としての強度分布を焦点面に描く。レンズ面上での位相差 NK 等は、レンズから後の空間が遅延線の組み MA, LA, KA 等として働く結果、A 点で回復されて同位相となる。光学的長さが、像に対応する方向ごとに全て等しいことによって仕分けが実現される。焦点面には銀化合物を塗った乾板が置かれる。最近ではフォト・ダイオード・アレイを使ったイメージセンサが使われることも多い。

であろう。サンプル速度の感度に対する関係は $AS \propto 1/\sqrt{B}$ ($2B$ =サンプル速度) であるから、速度が $1/10$ になっても、感度は 3 倍悪くなるにすぎない。

以下に、光学系と像合成についてもう少し具体的に見ることにしよう。

光学系

光も電波も電磁波である。光学望遠鏡が像を作るように電波望遠鏡でも像を作れないだろうか。光の場合の結像原理を調べて、同じことを電波で行えばよいだろう。図 4 はレンズによる結像を示している。正面からの光は O に集まるとしよう。矢印の方向 (θ 方向) から平面波が入射してくる。凸レンズを通るとき、中央に近い所を通る光ほどガラスを通過する距離が長い。ガラスの中で位相速度は c/n に遅くなる。だからレンズを出た光は中央部分の通過光ほど、位相の遅れが大きい。こうして入射平面波は球面波に変換され、有限の距離にある点 A に収束する。入射光子のエネルギー $h\nu$ 程度の結合エネルギーをもつ銀化合物が乾板に塗ってあれば、 A 点ではその化学結合が切れる。光が強ければ反応生成物も多く発生し、現像したときより黒く写る。大事な点は、到来方向ごとに光を選別してまとめ、それぞれの到来方向に

対応する乾板上の位置に導いている事である。角度 θ と乾板上の位置 x は、ディメンションが異なるが比例関係にある。これを可能にしているのは、レンズの各点 K, L, M から A 点までの光学的長さがうまく調節され、 θ 方向からの平面波に対してレンズ面上での位相の進み遅れが A 点で 0 にされているという事実である。

光の到来方向 θ が違えば、レンズ面上で場所ごとの位相が違ってくる。逆にレンズ面上で、場所ごとの位相の情報が得られれば、光の到来方向が分る。レンズから乾板までの空間は、 θ に応じてレンズ面上に発生した位相のずれを回復する遅延線 (ディレイ・ライン) の役割を果たしている。レンズと乾板の組み合わせにより、近軸光線という条件の下で、あらゆる θ に対する遅延線の組が自動的に用意される。その結果 θ に比例した位置 x で光が検出され、像は光の到来方向と強度分布の情報を与えてくれる。天体観測に必要な物理量は電磁波の到来方向であって、乾板上の位置ではない。実際、固有運動は $0.1''$ /年 のように、また位置座標は角度で表わす。人間は得られた像 (写真乾板) を有限の距離に置き、眼で見る。像 (写真) 上の位置 x の違いは、水晶体への入射光に再び到来方向の違いを引き起す。これを網膜上で再び位置の違いとして認識する。人間にとっては、このように星空の輝度分布が角度の関数であることと、像 (写真) 上の輝度分布が位置の関数であることの違いがあまりにないがちである。しかし結像原理においてはこの区別は必要である。

光学望遠鏡でも、最近ではイメージセンサが使われることがよくある。これは光検出用のダイオードをたくさん並べたもので、検波ダイオードのアレイ (配列) である

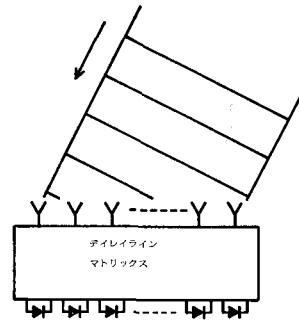


図 5 電波望遠鏡で像を作る。レンズの場合と同じく、遅延線の組 (ディレイライン・マトリックス) を用意する。端末の特定の検波ダイオードから見た全ての素子アンテナまでの電気長 (光路長) が、特定の方向からの平面波に対してびたりと合えばよい。各検波ダイオードからの電気長が、各々の方向からの平面波に対して同位相になるようにしておけば、各ダイオードの出力は対応する方向の電波強度を示すことになる。

(図 4). この場合は遅延線の組としての光学系と、検波ダイオードのアレイで像を検出する。ダイオードの数が画素の数である。

フェーズド・アレイにおける像合成

像を作る電波望遠鏡はこれと同じ方法で構成することができる。まずレンズ面上の各点に対応させてホーンアンテナを配列し、アレイアンテナとする。そして各到来方向ごとに調整された遅延線の組(ディレイライン・マトリックス)とその末端につけられた検波ダイオードのアレイを用意すればよい(図 5)。各到来方向に対応した各々の検波ダイオードには全てのホーンアンテナの出力が供給される。ということは、各ホーンアンテナの出力はダイオードの数だけに分配されなければならない。今回の試作機ならホーン 8 個、ダイオード 8 個なので各ホーンの出力を 8 分配し、遅延線の本数は $8 \times 8 = 64$ 本ですむ。しかし実用機のように 4096 個もホーンアンテナを並べるときには、各々のホーンから 4096 本のケーブルがダイオードに向かって出ていくことになる。つまり全部で $4096^2 = 1.7 \times 10^7$ 本のケーブルを遅延線として使うことになる。これは不可能である。コリレーター方式にしても、この半分程になるだけである。

今回試作した 8 素子フェーズド・アレイにはバトラー・マトリックスと呼ばれるディレイライン・マトリックスを使ってこの問題を解決した。予算の関係もあってディ

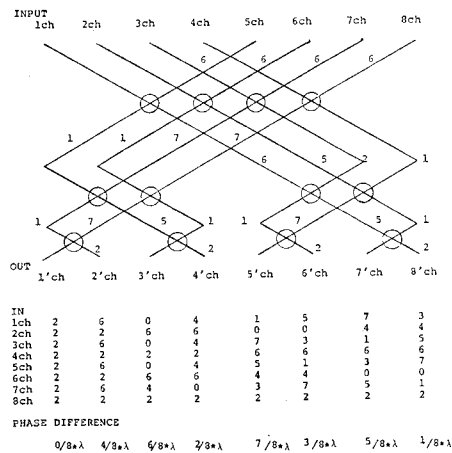


図 6 8 入力, 8 出力のバトラー・マトリックスの概念図。丸印が 2 入力, 2 出力の 90 度ハイブリッド素子。これを対角線方向に進む信号の位相は、折れ曲る方向に進む信号に比べて 90 度分だけ電気長(光路長)が長い。前後の遅延線の電気長は $\lambda/8$ を単位に書いてある。出力端には、各入力端までの電気長と、位相勾配が示してある。位相勾配の違いは観測方向の違いに対応する。

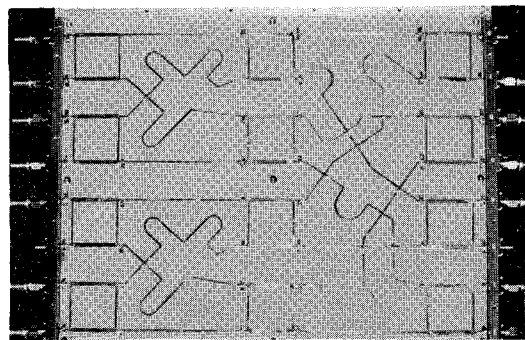
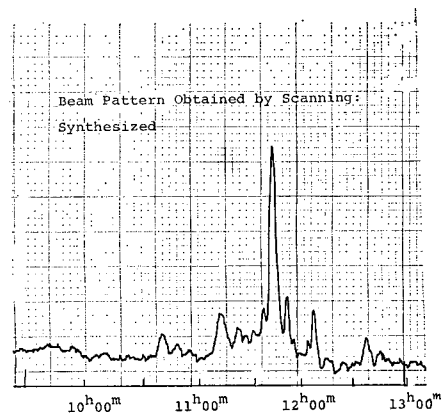


図 7 アルミナ基板上にプリントした 8 入力, 8 出力のバトラー・マトリックス。周波数 1.0~1.1 GHz. 12 個の正方形が 90 度ハイブリッドで、一辺の長さを $\lambda/4$ にしてある。対角線方向が直進より 90 度分長いことが分る。ハイブリッドにつながる遅延線の幾何学的長さが、位相変化をつける。



Beam Pattern Obtained by Scanning:
Single Horn

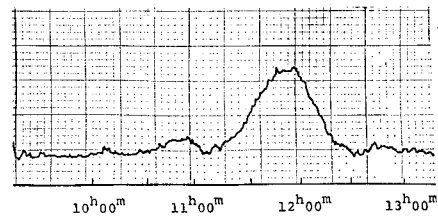


図 8 合成されたビーム(上段)。試作した 8 素子フェーズド・アレイの IF 部分にバトラー・マトリックスをつないでビームを合成する。下段は単一ホーンの指向性。この中に上段のビームを含め 8 本のビームが入る。いずれのパターンも太陽をスキャンして得た。横軸は時角、縦軸はリニアにとってある。

デジタル化は今回見送りとなった。この方式は名大・空電研究所のシンチレーション用アンテナで16素子のものがすでに働いている(周波数69MHz)。

バトラー・マトリックス

その原理は図6に示してある。丸で示してあるのは90度ハイブリッドと呼ばれる受動素子で、対角線方向にまっすぐ通る波に対しては180度の遅延を与え、そうでない方向に進む波に対しては90度の遅延を与える。その結果、対角線方向に進む波は、他の方向に進む波に較べて相対的に90度遅れる。各90度ハイブリッドは2入力、2出力で、ハイブリッドの前後の遅延量とこみになって、最終段の各出力端から各ホーンを見たときの光学的長さで一定の位相勾配をもたらす。つまり、各ホーンに一定の位相差をもって入射した平面波を同位相で加える機能を持つ。これを検波すればその方向からの到来波の強度が分る。各出力端に現われる位相勾配を実際に図6で求めてみると、バトラー・マトリックスが実感としてつかめてくる。

実際の物は図7に示すように、アルミナの基板上にプリント配線した。中心周波数1.05GHz、帯域幅100MHzで充分ビームが形成されている(図8)。バトラー・マトリックスの欠点としては調整用の遊びが1カ所も無いこと、長い経路では損失がでてきて振幅にアンバランスが発生することなどである。今回88素子の試作機ではこれらの問題は大きく現れることは無かったが、素子数が増せば問題になってくる。解決の方法はデジタル化であろう。バトラー・マトリックスは高速フーリエ変換(FFT)のアルゴリズムと等価であることがシュルトンによって1968年に示されている。しかし素人判りのしないFFTの代りに直感的なバトラー・マトリックスを調整してみると、光学望遠鏡も電波望遠鏡も全く同じ原理で像合成を行っているのが手にとるように見えてくる。

今回は理屈っぽい話を中心にした。IIではデジタル化、感度等について述べ、試作機建設の様子、受信機を始めとする我国の技術基盤、位相調整の実際等について書く予定である。本文の一部に宇宙電波懇談会シンポジウムの集録(「45mφ電波望遠鏡による天文学」1975、「ミリ波、サブミリ波、赤外干渉技術」1976、「最新の電波天文技術」1979)に大師堂が書いたものを利用した。この研究は1979、1980年度の科学研究費(484002)の補助を受けて行われた。

☆ ☆ ☆

丸善の出版書

理科年表

58年版

★東京天文台編 A6/定価920円

58年版では、野辺山に完成した世界最大級の電波望遠鏡による成果に基づき、電波銀河、星間分子などの最先端のデータをまとめるとともに、海洋のデータ、人口統計、有感地震回数表など最新の資料を提供する。

理科年表読本

こよみと天文・今昔

内田正男 著 B6/定価1,200円

気象と気候

高橋浩一郎・宮沢清治 著 定価1,200円

地震と火山

宇佐美龍夫・木村敏雄 編著 定価1,200円

銀河と宇宙

石田蕙一 著 (近刊)

丸善
出版部

(〒103) 東京都中央区日本橋3-9-2
第二丸善ビル ☎(03)272-0331