

# 電波干渉計とデータ処理方式

藤 下 光 身\*

## 1. はじめに

電波天文は 1931 年に波長 14.6 メートルでジャンスキーが銀河中心からの電波を受けたのを始まりに、現在までに、太陽に関しては、光学的方法では太陽表面に限られていたフレアの観測を、波長をミリメートルからキロメートルにまで変えることによって、太陽から地球に至るまで追うことが可能となったし、我々の銀河に関しては、波長 21 センチでその渦状構造を示したり、又一方では分子の発見で星の発生に迫り、さらに他方では新星・超新星の爆発後の殻状構造や中心に残るパルサーを見て星の消滅へと手を伸ばすなどの成果をあげてきた。加えてセイファート銀河から準星、あるいは 3°K 黒体輻射と宇宙論へもデータを提供したりして、人類が近年になって得た、地球大気を通過して外を見ることのできる第 2 の窓—電波—は古来からの光の窓と同様にその天体物理学上の意味の重要性を示して来たと考えられる。その電波天文の中でも、近年の電子計算機の発達を内に取り込んで、空間分解能で光学装置を越え、写真(電波写真)をも手にすることのできるようになった電波干渉計の技術には人類の英知の偉大さを感じないわけにはいかない。以下にどちらかと言えば英知というよりは狡知と言える、電波干渉計のソフトウェアを主体とする像処理の技術について概観をする。

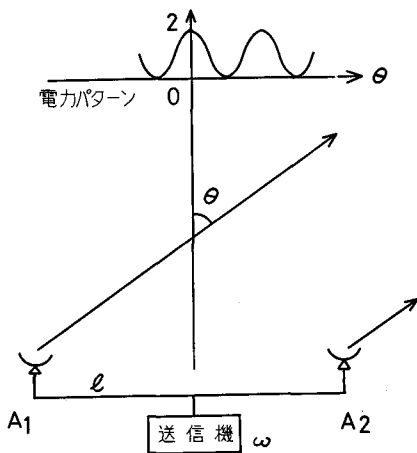


図 1 干渉計とそのアンテナパターン

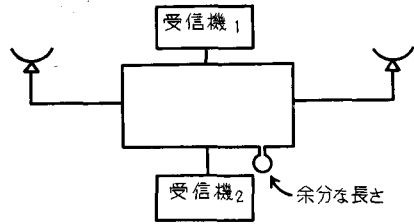
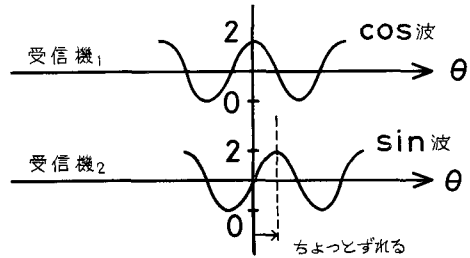


図 2 干渉計とフーリエ成分

## 2. 電波干渉計による天球の輝度の見方

今、1つの送信機から等しい距離をもって結合された 2 つのアンテナを考える (図 1)。このアンテナペアをアンテナ正面より角度で  $\theta$  だけ離れた方向から見た時の電界を計算する。アンテナ  $A_2$  よりの天球上の電界  $E_2$  を

$$E_2 = A \sin \omega t$$

とすれば、アンテナ  $A_1$  からは

$$E_1 = A \sin \omega(t - l \sin \theta / c)$$

となる。ここで  $\omega$  は使用した電波の振動数、 $t$  は時間、 $l$  はアンテナ間の距離、 $c$  は光の速さを意味する。 $E_1$  は  $E_2$  に比べてアンテナの天球よりの見かけ上の距離の差による分だけその位相の部分がずれてくる。さてこのアンテナペアによる天球上の電力の分布は

$$P(\theta) = |E_1 + E_2|^2 = 4A^2 \sin^2(\omega t + \omega l \sin \theta / 2c) \cos^2(\omega l \sin \theta / 2c)$$

となり、電波の振動数  $\omega$  に比べてゆっくりした変化分にだけ注目すれば

$$P(\theta) \propto \cos^2(\omega l \sin \theta / 2c) = 1 + \cos(\omega l \sin \theta / c)$$

さらにアンテナ正面近くの天球のみを問題とすれば

$$P(\theta) \propto 1 + \cos(\omega l \sin \theta / c) \approx 1 + \cos(\omega l \theta / c)$$

つまりアンテナペアによる電波の電力は天球上ではアン

\* 名大・理 M. Fujishita: Radio Interferometer and Data Reduction Methods

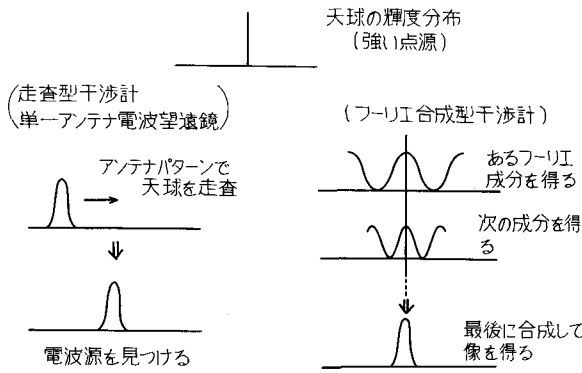


図 3 電波望遠鏡の天球の見方

テナペアの正面で強くなった、アンテナの間隔  $l$  とアンテナ正面からの角度距離  $\theta$  に関する余弦関数となるのである。さてこのアンテナペアを受信機として用いれば従って天球上にこの様な感度を持つものとなるのである。このタイプのものを加算型電波干渉計という。これに対立する用語に乗算型電波干渉計がありこれは  $P(\theta)$  に定数を含まないアンテナパターンを持つ。

ところで今、図 1 の送信機から  $A_2$  のアンテナに至る間に、感度のパターンが  $\pi/2$  だけずれる様な長さのものを挿入するならば天球の電力パターンはずれて正弦関数となる。従って図 2 の様な構成の受信機 2 つを持つものを考えれば受信機 1 に関しては天球輝度の余弦成分、受信機 2 に関しては正弦成分を得ることとなるのである。つまりこのアンテナで天球上の輝度は、そのアンテナ間隔に関連したフーリエ成分に分解されるのである。この様な天球の見方をするものをフーリエ合成型電波干渉計と言う、対立する用語には走査型電波望遠鏡がある。この走査型というのは干渉計でない通常のアンテナ 1 つの電波望遠鏡も含んでいるものである。

さてそこで天球の輝度の分布を調べようとするときに次の 2 つの方法があるということになる (図 3)。それは第 1 の方法としては、単 1 のアンテナの電波望遠鏡や走査型電波干渉計の様に、見たい天球のあるアンテナの感度のパターンで走査して電波源を見つける方法である。第 2 の方法はフーリエ合成型干渉計の場合で、ある間隔のアンテナペアで天球を見てあるフーリエ成分を得て、さて次にはアンテナの間隔を変えて次のフーリエ成分を得るということを繰り返して、最終的に必要なすべてのフーリエ成分を得て、逆フーリエ変換をして天球の輝度分布を得る方法である。前者はハードウェアで作ったアンテナビームで天球を見るのに対し、後者は観測の後にソフトウェアでアンテナビームを作ることができる。この違いから前者に対する後者の長所が出て来るの

である。例えばある天球領域に強い電波源があるのかどうかということに関しては、前者は領域のすべてを走査しないと結論が出ないのに対し後者の場合には、はじめのフーリエ成分を見ただけですぐにわかってしまうという利点がある。又、どの程度の空間分解能が求められるかがはじめからはわからない場合に、後者の干渉計では低いフーリエ成分からはじめて図面を作りながら必要な分解能まで高いフーリエ成分を加えていく様なこともできるわけである。

### 3. データ処理方式

前章でフーリエ合成型電波干渉計は天球の輝度分布のフーリエ変換器となっていることを示した。このとき天球上の輝度分布を再現するのに必要なすべてのフーリエ成分が得られれば処理上の問題は何もないのであるが、例えば高分解能を得るために、高い方のフーリエ成分を要求すると、アンテナペアの間隔を長くしなければならず、土地の問題、あるいは各アンテナから位相を保って受信機まで電波を送ることの困難さ、又 VLBI (超長基線干渉計) においては地球が小さすぎるなどの理由によってカットオフがあり必要な成分を得ることができない。又 2 次元的な輝度分布の図を得るためには、アンテナペアを天球に対し様々な方向へ様々な間隔で置いて、あるいは天球に対し地球が回転することを利用して (超合成干渉計) フーリエ成分を得るのであるが、これもやはり 2 次元的に十分なフーリエ成分を得るのは容易でなく、そこにソフトウェアによる様々な種類の処理が求められる理由がある。その処理は実は走査型干渉計でも時間をかければ結局フーリエ合成型電波干渉計と同様に、天球輝度分布のフーリエ成分を得ることができるのであって (実際にはこの際に時間を空間として見、又空間を時間として見るという時空の混合 (!) が生じるためにややこしくも面白い現象が見られるのである……) そして

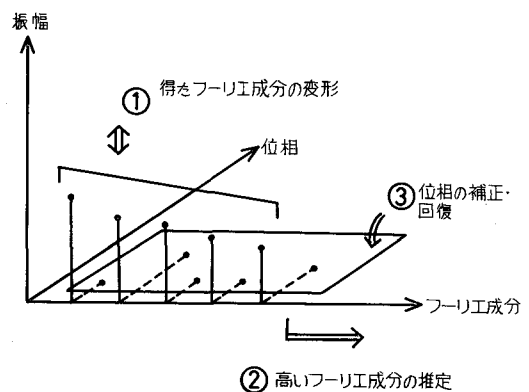


図 4 第 1 表分類の意味

表 1 主に 1 次元だけあるいは 2 次元だけで考える方法

	主に空間周波数空間にて処理	主に実空間にて処理	両空間を用いる・その他
① フーリエ成分の付加なし	スムージング リストラクション フィルタリング	ランニングミーン コードコンストラクション サクセシブサブステイテューション	
② フーリエ成分の付加あり	MEM (マキシマムエントロピー法) ≒AR (オートリグレシブ) デコンポジション MLM (マキシマムライクフリード法) スフェロイド関数を用いる方法 バイロードの方法	クリーン クリーン 2	2 領域往復自乗誤差和最小化法 石黒氏のフーリエ空間・像空間往復イテレーション法
③ 位相の補正・回復をする	石黒氏の位相補正法		バーズのヒルベルト変換による方法 VLBI の像処理方法

表 2 主に 1 次元像から 2 次元像を得る方法

フーリエ変換を用いる方法	実空間上で行なう方法	その他の方法
フーリエ変換法 コンボリューション法	代数的再生法 (ART) {加算型 乗算型 同時反復法 (SIRT) 後方伝播法 バインシュタインの方法 最小 2 乗誤差法 ゴードンの方法 {第 1 アルゴリズム 第 2 アルゴリズム 第 3 アルゴリズム	行列法 ブレイスウェル・リドルの方法

このことに対応してそれらの像処理の方法もフーリエ成分の空間周波数空間上で処理をするもの、あるいは実空間上で処理をするもの、又これら両空間を行ったり来たりしながら処理をするものなどを走査型でもフーリエ合成型でも使用する等と多様を極めてい。さてここではまずこれらを、天球に対しさまざまな方向で得た 1 次元の走査像あるいはフーリエ成分から 2 次元の図を作り出す方法 (表 2) と 1 次元あるいは 2 次元図上で像処理をする方法 (表 1) とに分けてそれらを見ていこうと思う。ところでこの表 1 の分類を図で見ると (正弦成分, 余弦成分) のデータの組は (振幅, 位相) の組へと変換できるので図 4 の様に表現できる。

3-1 フーリエ成分の付加のない処理の例

—スムージングとリストラクション—

例えば図 5 の様に直線上に等しい間隔を持って並べられた電波干渉計を考える (グレーティングタイプ干渉

計)。これで天球上の点状電波源を見たとすればその得られるフーリエ成分は図 5 左下の様になる。点状電波源であってもこの様に重みのかかった成分が取れるのはアンテナの方で隣どうしの組み合わせの数に対して何個かおきのアンテナの組み合わせの方が数が減るためである。さてこの様にして観測から得られたフーリエ成分を同図右の様に重みを高い方のフーリエ成分を強める様になおしてやることをリストラクションという。これは電波源の像では高い分解能が得られるがアンテナのサイドローブによる副次的な像が強く出て図が見にくくなる。一方右の様なフーリエ成分が得られた場合に左の様に低いフーリエ成分に重みをかける様にすることをスムージングと言う。こっちは逆に分解能は悪くなるが見易い図を得ることができる。この様にフーリエ成分に種々の重みをかけることによってサイドローブと分解能の組み合わせを目的によって選ぶことができる。

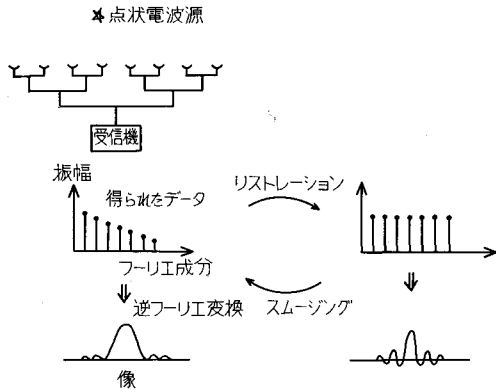


図 5 スムージングとリストレーション

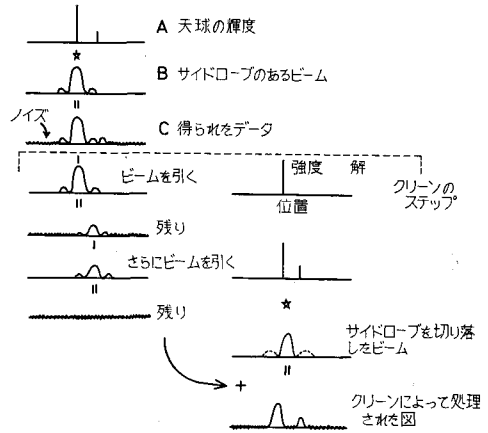


図 6 クリーン

3-2 フーリエ成分の付加する場合の例

—クリーンとクリーン 2—

第2章で式で示した様に高分解能つまり高いフーリエ成分を得るためにはアンテナの間隔を長くしなければならないのであるがこれには限度があり一般には電波源の持つ構造に対して不十分なフーリエ成分しか得られない。例えば図5の右図の例の様にアンテナの個数が8つのためフーリエ成分では第7成分までしか得られないこととなる。さてこのとき、一番順当と思われる処理とはどんなものなのであろうか……。まずそのままフーリエ変換してみる、するとそれはサイドローブが多く、天球の輝度分布をそのまま表現してはいない。そこでスムージングをする(同図左下)、今度はサイドローブが目立たなくなったが点源とはほど遠い広がりを持ってしまふ。実はこれらは観測されていないフーリエ成分は0であるという仮定を知らない間に取り込んでしまっているのであるが、この仮定はとても受け入れ難いのであってこれが図となって現われているのである。そこである種の仮定—その方法によって様々だが例えばエントロピーという量を導入し、真の図はそれが最大となるものであるとか、天球の輝度は負値を取らないなどである—を設定しその仮定に従ってフーリエ成分を推定してよりよい図面とする手を取る。ここではその一例として実空間でフーリエ成分の付加を行なうクリーンを取りあげて見る。図6でAは天球の輝度の分布(2つの点状電波源)を示す、今アンテナ系のビームがBのようなサイドローブの大きいものであったとしよう。この電波望遠鏡で見た電波源はAとBのコンボリューションとなってCの様に見える。さてクリーンとはこのCをデータとして、ビームの型を知っている場合にサイドローブのない見易い図を作る方法である。まずデータからビームの型Bとの相関の一番強い点をさがし出してその位置と強さを解として覚える。次にデータからその強さのビームを引いた図

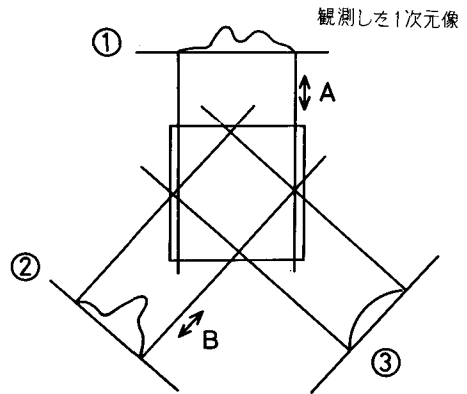


図 7 代数的再生法(観測した1次元像)

を作り、これを次のステップのデータとしてさらにビームとの相関の強い所をさがし解を先程の解へ加えてビームを引く、これを繰り返して残りの図が S/N のレベル以下となるまで行なった後に、解にサイドローブを切り落したビームでコンボリューションをして残りの図を加えてそれを答とする。実際にはこれは広がった電波源に対してはなかなかむづかしくそのためデータからビームを引くときに重みを乗じたりする。クリーン2は平がった電波源でもうまくいく様に解とコンボリューションするビームに工夫を加えたものである。

3-3 1次元像から2次元像を得る方法

—代数的再生法(ART)—

さて干渉計は一般に1次元的に配置することが多く、又2次元的に配置しても各々のアンテナペアは1次元的配置であるので、図1においてアンテナは紙面に垂直な方向には輝度の分布を分解することができず、この方向

に積分した 1 次元の情報しか得られない。従って 2 次元の図を得るにはこれら 1 次元の情報を何らかの処理をして作るのであるが、1 次元情報としてフーリエ成分を得ている場にはそれらを天球に対する角度で 2 次元に並べて逆フーリエ変換をすればよく（フーリエ変換法）一般にはこの方法が用いられる。しかしながら天球に対する角度の散らばり具合が十分でない場合には代数的再生法の方がいい図が得られる。その方法は次の様である。つまり今天球に対し図 7 で 1, 2, 3 の様な方向で 1 次元の図が得られているとする、このときまず 1 の強度を図面上で A の方向へ様に配分する。次には 2 の方向へ積分してみて 2 のデータと合うかどうかを見て次に、その差の分を図面上で B の方向へ様に配分する。このさい図面上で負値となる部分の値は 0 とする（天球の輝度は負値を取らない）、さて次には 3 の方向へ積分して又差を取ってもどすのである。これを繰り返して 1, 2, 3 いずれの方向から見てもデータと合う様にするのである。

4. おわりに

ソフトウェアを主体とする像処理の問題はあくまでもハードウェアの不足分を補うものである。結局のところ 0 を付加する場合も含めて見てもしないフーリエ成分を付加しているのであるから、無限にある推定される解の中からある仮定の下に 1 つだけを選び出しているのである。従ってこうらしいとは思ってもこうだとは言えないのであり、そこに大きな問題がある。しかしいつになってもその先を見てみたい人の心はあるであろうから、ハードウェアで取ったデータがソフトウェアの像処理を必要としなくなることはないであろう。

学会だより I

昭和 55 年度科学研究費補助金配分審査委員候補者

日本学術会議研究費委員会より標記の件について推薦の依頼がありましたので、本学会として評議員の書面投票により下記の方々を推薦いたしました。

第 1 段審査委員候補者：高窪啓弥，加藤正二，内田豊

第 2 段審査委員候補者：川口市郎，末元善三郎

文部省はこの推薦にもとづいて第 1 段審査委員 2 名，第 2 段審査委員 1 名を任命します。なお第 1 段審査委員には海野和三郎氏が任期 1 年を残しております。

☆ ☆ ☆

丸善の出版書

理科年表

●二頁一頁から新しい発見を!!

55 年版

A 東京  
6 天文台  
/ 8 6 0 円 編

科学研究に欠かすことのできない基礎データを暦・天文・気象・物理化学・地学の各分野にわたって完全に集約。身近に置けるデータバンクとして実務から趣味まで幅広く活用できます。

●改訂のポイント●

55 年版では、暗黒星雲などを含めた最近の銀河系の研究進展に相俟って、銀河の頂が全面改訂されており、こぎつね座の新星状天体、X 線衛星「はくちょう」など最新のトピックスも追加されています。また、地震の項では日本各地における有感地震回数表を追加し、地震観測システムを含めた地震予知の現況を示しています。

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)272-7211