

簡単な電波望遠鏡による低周波電波天文学

5. 干渉計による観測

前田 耕一郎*

1. 受信システムのグレードアップ

これまで述べた電波望遠鏡は通信型受信機の AF (音声周波数) 出力信号を検波するだけの単純なものであったが、次のような工夫をすることで、天体電波に対する受信感度を上げることができただけでなく、干渉計に応用することができる。図1にその受信システムのブロック図を示す。要点は、通信型受信機の前に切り換えスイッチ (高周波数(RF)の信号を切り換えるのでRFスイッチと呼ぶ) を付けること、通信型受信機の AF 出力信号をスイッチングと同期させて検波 (位相検波と呼ぶ) ができるようにすることである。

このようなシステムの働きについて考えてみよう。音声周波数でスイッチングを行い、Aへの信号とBへの信号を交互に通信型受信機へ入力する。いま、Aに入力されている信号がBに入力されている信号より大きいと仮定しよう。図2aに示すように、切り換え周波数で振幅変調(AM)された信号が通信型受信機へ入力される。通信型受信機では増幅とAM検波が行われる。通信型受信機のAF出力信号を切り換え周波数のバンドパスフィルターにかけると、図2bのようなAF信号が得られる。

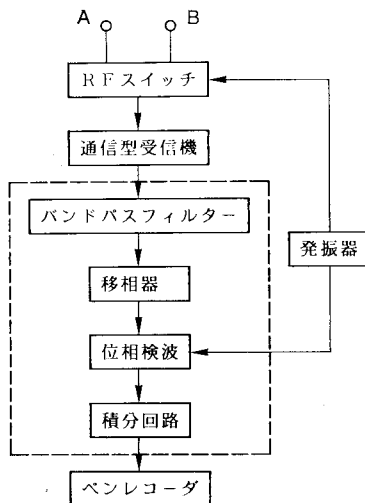


図1 グレードアップした受信システムのブロック図

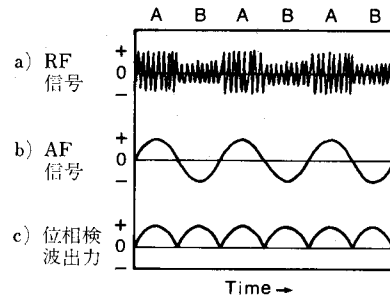


図2 スwitchングと位相検波による信号の変化

Aに対応する部分はプラス、Bに対応する部分はマイナスとなる。Aに対応する部分はその符号のまま、Bに対応する部分は符号を逆転させて出力するように、スイッチングと同期させて位相検波を行うと、図2cのようなプラスの位相検波出力電圧が得られる。この位相検波のタイミングを合わせるために位相器が必要となる。積分回路により位相検波出力電圧の平滑化を行った後、ペンレコーダへと導く。もし、上で考えたのとは逆にAに入力されている信号がBに入力されている信号より小さければ、位相検波の出力電圧はマイナスとなる。つまり、位相検波を行うと、出力電圧がプラスかマイナスかにより、A、B どちらの入力信号が大きいか判定でき、また、位相検波出力電圧の絶対値により2つの入力信号の差の大きさを知ることができる。

実際に、どのような物を使って図1のシステムを作ったかについて述べよう。スイッチング素子として、アール・アンド・ケー社の SWD-1 (4千円) を用いた。SWD-1 は方形波の信号により駆動される。オペアンプにより無安定マルチバイブレータを作り、方形波の発振器とした。発振周波数は、電源周波数 (関西では 60 Hz) の整数倍を避けて、275 Hz とした。位相検波回路の検波のタイミングをとるための参照信号としても方形波の信号が必要である。発振器の出力はオペアンプによるボルテッジフォロワーを通して約±13ボルトの信号としてRFスイッチへ、また、別のボルテッジフォロワーを通して約±4ボルトの信号として位相検波回路へと導いた。これらのオペアンプ回路はいずれも基本的な回路であるので、オペアンプ回路について書かれた本を参照すれば、比較的簡単に作れる。位相検波回路として、エヌエフ回路設計ブロック社の CD-505R2 (1.5万円) を用い

* 兵庫医大 Koitiro Maeda: Low Frequency Radio Astronomy with Simple Radio Telescopes 5. Observations with an Interferometer.

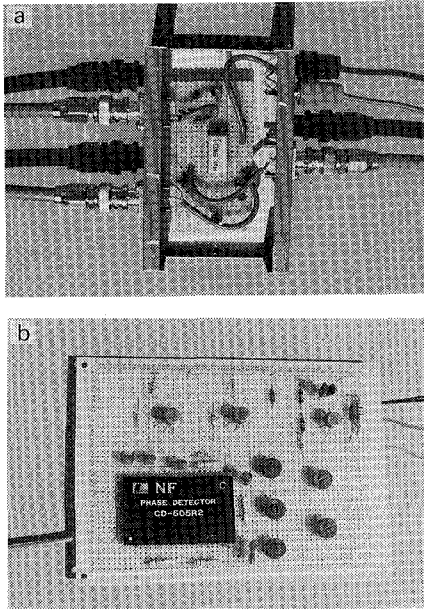


図 3 a) RF スイッチ b) 発振器と位相検波回路

た。CD-505R2 には、図 1 のバンドパスフィルタから積分回路まで (図 1 の点線で囲った部分) すべてが含まれている。データブックにしたがって各部分の主要な抵抗やコンデンサの値を決めて外付けするだけでよい。図 3 に、RF スイッチの写真 (a)、および発振器と位相検波器の部分の写真 (b) を示す。

1978 年 5 月～10 月の Sky & Telescope 誌にスウェンソンが“アマチュア電波望遠鏡”と題して連載した記事の中で、図 1 と同様のシステムについて述べている。スウェンソンの記事では、トランジスタ、オペアンプ、ダイオードなどの素子を使った、かなり複雑な回路となっている。SWD-1 や CD-505R2 を用いれば、各回路の働きを理解する必要はあるが、複雑な回路を作るわずらわしさはほとんど取り除かれる。

次に、このような受信システムをどのように使用するかについて述べることにする。

2. ディック切り換え

図 1 のシステムを用いるとアンテナからの信号を感度よく受信することができる。A にアンテナをつなぎ、B には受信機の入力インピーダンスと等しい 50 オームの抵抗をつなぐ (図 4)。このようにすると、受信機が A につながったときにはアンテナからの雑音電力 P_a と内部雑音による雑音電力 P_i の和 $P_a + P_i$ が入力され、B につながったときには 50 オームの抵抗による雑音電力 P_r と内部雑音による雑音電力 P_i が入力されることになる。位相検波出力の電圧は A に入力される電力と B に入力さ

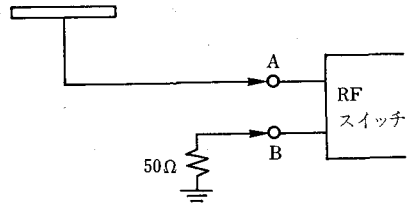


図 4 ディック切り換え

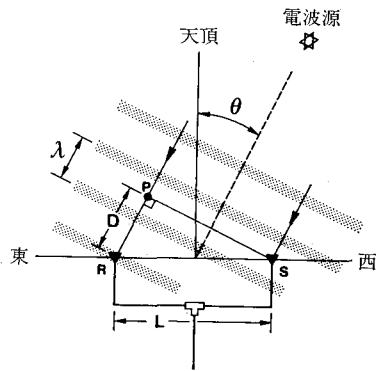


図 5 干渉計の原理を示す概念図

れる電力の差、つまり、 $P_a - P_r$ に比例する。ここで扱う電波源の場合、 P_a は P_r に比べて十分大きいので、ほぼ P_a に比例する出力電圧が得られると考えてよい。前回までの簡単な電波望遠鏡で得られるのは、 $P_a + P_i$ に比例する出力電圧であったが、この方式では内部雑音の成分が除去できるので、アンテナからの信号に対して受信機のゲインを上げて観測することができる。特に、アンテナからの信号が内部雑音に比べて小さい場合にはこの方式が偉力を発揮する。このようにアンテナからの信号と基準雑音源を切り換える方式は、考案者ディッケにちなんでディッケ切り換え方式と呼ばれている。

3. 干渉計の原理

図 1 のシステムは干渉計にも応用できる。どのように使うかを説明する前に干渉計の原理について考えておこう。図 5 のように、2 本のアンテナ (R と S) が東西方向に距離 L だけ離して置かれているものとしよう。2 本のアンテナを結ぶ直線を基線 (ベースライン) と呼ぶ。簡単のために電波源は東より現れ、天頂を通り西へ沈むものと仮定する。これは、赤道上で東西方向に基線を取り、天頂を通過する電波源を観測する場合に相当する。図 5 に示すように天頂方向と電波源の方向のなす角が θ であるとしよう。電波源から等方的に電波が放射される場合、電波の波面は球面となるが、電波源から十分遠くの場所で観測すると、球面のほんの一部を観測することになるので、波面は電波の進行方向に直交する平面で近

似できる。図5は2本のアンテナと電波源を含む平面で考えているので、波面は紙面に垂直な平面で表される。ある瞬間を考えると、水面の波と同様に、空間的に電界の山と谷が繰り返されるパターンができる。図5には、そのようすが縞模様により示されている。影で示したところが電波の電界が山となる波面の位置であり、山と山の中央が電界が谷となる波面の位置を表す。図5に示すように、山と山の間隔が電波の波長 λ である。この山と谷のパターンが光速で矢印の方向に進む。そのため、アンテナを電界の山と谷が交互に通過するので、アンテナにより電界の時間的な振動変化が観測される。さて、図5の場合、アンテナRは電界の山を観測しているのに対してアンテナSは電界の谷を観測している。このように、ある瞬間に受信される電波の電界は、空間的に離れた場所にあるアンテナRとアンテナSでは異なっている。この違いはどのように表せばよいだろう。図5において、点PはアンテナSと同じ谷にある。この谷はまだアンテナRには達していない。アンテナRと点Pの距離 D だけ電波がさらに進むと、この谷はアンテナRに達する。距離 D は、

$$D=L \sin \theta \quad (1)$$

である。ある瞬間の電波による電界の変化は、アンテナRと点Pを通る直線上で、正弦関数により表すことができる。山から山までの距離 λ が角度で 2π （以下、角度の単位としてラジアンを用いる）に当たるから、距離 D に対応する角度 ϕ （アンテナRと点Pの位相差と呼ぶ）は、

$$\phi=2\pi L \sin \theta / \lambda \quad (2)$$

である。点Pでの電界とアンテナSでの電界の位相差はゼロであるから、アンテナRにおける電界とアンテナSにおける電界の位相差は ϕ である。図5の場合 $D=(3/2)\lambda$ であるから、位相差は 3π となる。

さて、空間的に電界が正弦関数で変化する場合には、各アンテナで観測される電界の時間的な振動も正弦関数で表される。2つのアンテナにおける電界の時間的な振動には、やはり、 ϕ の位相差ができる。したがって、アンテナSにおける電界の振動変化を

$$E_S(t)=\sin(2\pi ft+\phi/2) \quad (3)$$

と表すと、アンテナRにおける電界の振動変化は、

$$E_R(t)=\sin(2\pi ft-\phi/2) \quad (4)$$

と表される。ここで、 f は電波の周波数、 t は時刻を表す。また、電界の振幅は簡単のため1としてある。

加算型干渉計の場合、2つのアンテナからの出力の和 $E_R(t)+E_S(t)$ を受信機に入力する。したがって、加算型干渉計の出力は $E_R(t)+E_S(t)$ の2乗の時間平均値、すなわち

$$\langle (E_R(t)+E_S(t))^2 \rangle_t = 1 + \cos \phi \quad (5)$$

に比例する。地球の自転により電波源の方向と天頂方向のなす角 θ が変化するので、位相差 ϕ も時間と共に変化する。 ϕ が 2π の整数倍となる方向に電波源があるときには、山と山が重なり合うので、電界は強まる。また図5のように、 ϕ が 2π の整数倍 $+\pi$ となる場合には山と谷あるいは谷と山が打ち消し合い電界を合成するとゼロとなる。このように電波源の方向により、合成された電界は変化する。電波源の方向に対して、干渉の効果により出力の大きさがどのように変化するかをグラフで表し、そのパターンをフリンジパターンと呼ぶ。

乗算型干渉計は次のように構成することができる。2つのアンテナからの出力から $E_R(t)+E_S(t)$ と $E_R(t)-E_S(t)$ の2つの成分をつくる。そして、各成分を2乗して差をとると、

$$(E_R(t)+E_S(t))^2 - (E_R(t)-E_S(t))^2 = 4E_R(t)E_S(t) \quad (6)$$

となり、電界の掛け算成分が得られる。式(3)および式(4)を用いると、乗算型干渉計の出力は、

$$\langle 4E_R(t)E_S(t) \rangle_t = 2 \cos \phi \quad (7)$$

に比例する。加算型干渉計と乗算型干渉計のフリンジパターンは、それぞれ式(5)と式(7)で表される。加算型干渉計の場合、フリンジパターンは負になることはないが、乗算型干渉計の場合には負にもなる。

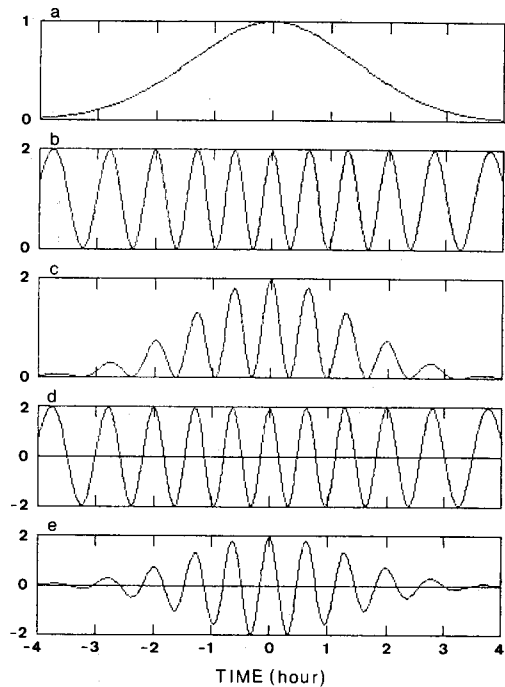


図6 干渉パターンのシミュレーション。各グラフの横軸は南中時刻からの経過時間を表す。a) 素子アンテナのビームパターン b) 加算型干渉計のフリンジパターン c) 加算型干渉計の出力 d) 乗算型干渉計のフリンジパターン e) 乗算型干渉計の出力

似できる。図5は2本のアンテナと電波源を含む平面で考えているので、波面は紙面に垂直な平面で表される。ある瞬間を考えると、水面の波と同様に、空間的に電界の山と谷が繰り返されるパターンができる。図5には、そのようすが縞模様により示されている。影で示したところが電波の電界が山となる波面の位置であり、山と山の中央が電界が谷となる波面の位置を表す。図5に示すように、山と山の間隔が電波の波長 λ である。この山と谷のパターンが光速で矢印の方向に進む。そのため、アンテナを電界の山と谷が交互に通過するので、アンテナにより電界の時間的な振動変化が観測される。さて、図5の場合、アンテナRは電界の山を観測しているのに対してアンテナSは電界の谷を観測している。このように、ある瞬間に受信される電波の電界は、空間的に離れた場所にあるアンテナRとアンテナSでは異なっている。この違いはどのように表せばよいだろう。図5において、点PはアンテナSと同じ谷にある。この谷はまだアンテナRには達していない。アンテナRと点Pの距離 D だけ電波がさらに進むと、この谷はアンテナRに達する。距離 D は、

$$D=L\sin\theta \quad (1)$$

である。ある瞬間の電波による電界の変化は、アンテナRと点Pを通る直線上で、正弦関数により表すことができる。山から山までの距離 λ が角度で 2π （以下、角度の単位としてラジアンを用いる）に当たるから、距離 D に対応する角度 ϕ （アンテナRと点Pの位相差と呼ぶ）は、

$$\phi=2\pi L\sin\theta/\lambda \quad (2)$$

である。点Pでの電界とアンテナSでの電界の位相差はゼロであるから、アンテナRにおける電界とアンテナSにおける電界の位相差は ϕ である。図5の場合 $D=(3/2)\lambda$ であるから、位相差は 3π となる。

さて、空間的に電界が正弦関数で変化する場合には、各アンテナで観測される電界の時間的な振動も正弦関数で表される。2つのアンテナにおける電界の時間的な振動には、やはり、 ϕ の位相差ができる。したがって、アンテナSにおける電界の振動変化を

$$E_S(t)=\sin(2\pi ft+\phi/2) \quad (3)$$

と表すと、アンテナRにおける電界の振動変化は、

$$E_R(t)=\sin(2\pi ft-\phi/2) \quad (4)$$

と表される。ここで、 f は電波の周波数、 t は時刻を表す。また、電界の振幅は簡単のため1としてある。

加算型干渉計の場合、2つのアンテナからの出力の和 $E_R(t)+E_S(t)$ を受信機に入力する。したがって、加算型干渉計の出力は $E_R(t)+E_S(t)$ の2乗の時間平均値、すなわち

$$\langle(E_R(t)+E_S(t))^2\rangle_t=1+\cos\phi \quad (5)$$

に比例する。地球の自転により電波源の方向と天頂方向のなす角 θ が変化するので、位相差 ϕ も時間と共に変化する。 ϕ が 2π の整数倍となる方向に電波源があるときには、山と山が重なり合うので、電界は強まる。また図5のように、 ϕ が 2π の整数倍 $+\pi$ となる場合には山と谷あるいは谷と山が打ち消し合い電界を合成するとゼロとなる。このように電波源の方向により、合成された電界は変化する。電波源の方向に対して、干渉の効果により出力の大きさがどのように変化するかをグラフで表し、そのパターンをフリンジパターンと呼ぶ。

乗算型干渉計は次のように構成することができる。2つのアンテナからの出力から $E_R(t)+E_S(t)$ と $E_R(t)-E_S(t)$ の2つの成分をつくる。そして、各成分を2乗して差をとると、

$$(E_R(t)+E_S(t))^2-(E_R(t)-E_S(t))^2=4E_R(t)E_S(t) \quad (6)$$

となり、電界の掛け算成分が得られる。式(3)および式(4)を用いると、乗算型干渉計の出力は、

$$\langle 4E_R(t)E_S(t) \rangle_t=2\cos\phi \quad (7)$$

に比例する。加算型干渉計と乗算型干渉計のフリンジパターンは、それぞれ式(5)と式(7)で表される。加算型干渉計の場合、フリンジパターンは負になることはないが、乗算型干渉計の場合には負にもなる。

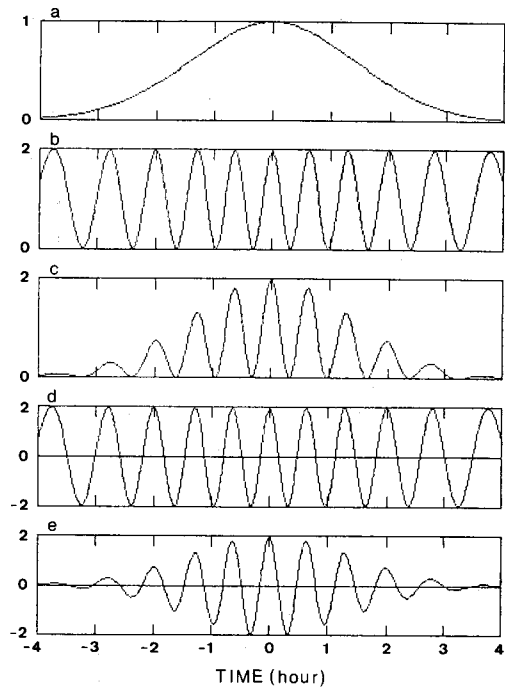


図6 干渉パターンのシミュレーション。各グラフの横軸は南中時刻からの経過時間を表す。a) 素子アンテナのビームパターン b) 加算型干渉計のフリンジパターン c) 加算型干渉計の出力 d) 乗算型干渉計のフリンジパターン e) 乗算型干渉計の出力

干渉計で観測した場合、どのような出力が得られるかについてパソコンでシミュレーションを行ってみた。図 6 は、観測地点の緯度 0° 、電波源の赤緯 0° 、ベースラインは東西方向に 6λ の条件で計算された結果である。上では干渉による効果のみを考えたが、実際の観測では、各アンテナの有効面積が電波源の方向によって変化することも考慮しなければならない。a) は各アンテナのビームパターンであり、半値幅 50° のガウシアンカーブで近似されるものと仮定している。b) は、加算型干渉計とした場合のフリンジパターンであり、a) と b) を掛け合わせた c) が観測される干渉パターンとなる。同様に、d) は乗算型干渉計のフリンジパターン、c) は観測される干渉パターンである。

4. 干渉計による観測

観測には 50 MHz のアマチュアバンド用に市販されている 5 素子八木アンテナ(図 7) 2 本を用いた。観測周波数は 49.5 MHz、ベースラインはほぼ東西で 70.4 m (約 11.6λ) である。山すその土地であり、ベースラインはかなり傾斜していたが、詳しい測量までは行わなかった。

加算型干渉計の場合には次のようにして観測を行った。2 つのアンテナからの出力を同じ長さのケーブルで合成し RF スイッチの A につなぎ、B には 50 オームの抵抗を接続する(図 8a)。つまり、2 本のアンテナからの出力を合成し、ディケッ切り換え方式の受信機に入力する。2 つのアンテナからの出力の合成にはアール・アンド・ケー社のパワーコンバイナーを用いた。8 ピンの素子あるいはコネクタ端子が取り付けられているコネクタタイプのものが市販されている。少しコストは高くなる

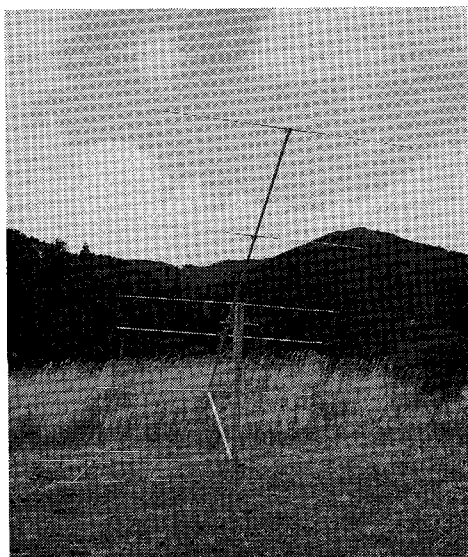


図 7 5 素子八木アンテナ

が、コネクタタイプはすぐに使えるので便利である。図 9a は、加算型干渉計で観測された銀河電波、およびシグナス A (Cyg A) とカシオペア A (Cas A) である。銀河電波のように広がった電波源の場合には、色々な方向からの電波に対する干渉計出力が合成されるため、干渉パターンは観測されず、ゆっくりとした銀河電波の強度変化が観測されるのみである。銀河電波の変化の上に、波打って見えるのが、シグナス A およびカシオペア A による干渉パターンである。このように、加算型干渉計の場合、点源の干渉パターンは銀河電波に重なって現れる。図 9a において、11 時頃スパイク状に受信されているのは太陽電波バーストである。

乗算型干渉計は次のように構成した。アール・アンド・ケー社の 180° ハイブリッドを用いて 2 つの 5 素子八木アンテナからの出力の和および差を作る。この素子も 8 ピンのものと、コネクタタイプのものが市販されている。図 8b に示すように、和を A に、差を B に入力する。通信型受信機の AF 出力信号を位相検波すると、A への入力 2 乗と B への入力 2 乗の差が得られるので乗算型干渉計となる。銀河電波成分の寄与は 2 つのアンテナからの出力の和でも差でもほとんど同じであるのでキャンセルされ、点源の干渉パターンのみが取り出せる。つまり、乗算型干渉計にすると、内部雑音だけでなく背景の銀河電波の成分も取り除けるので、点源の干渉パターンが感度よく観測できる。図 9b は、カシオペア A とシグナス A を乗算型干渉計で観測した結果である。5 素子八木アンテナのビームの半値幅は、 80° 程度と広いので、2 つの電波源を完全に分離して観測することはできない。そのため、図 9a に見られるように、カシオペア A とシグナス A の干渉パターンが重なり合っている。また、ベースラインの傾きのため、南中時刻に出力がピークとはなっていない。カシオペア A とシグナス A は赤緯

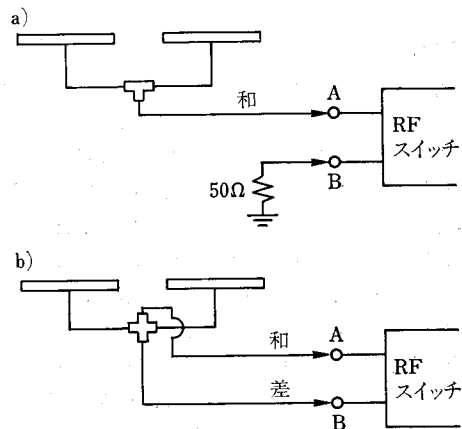


図 8 a) 加算型干渉計 b) 乗算型干渉計

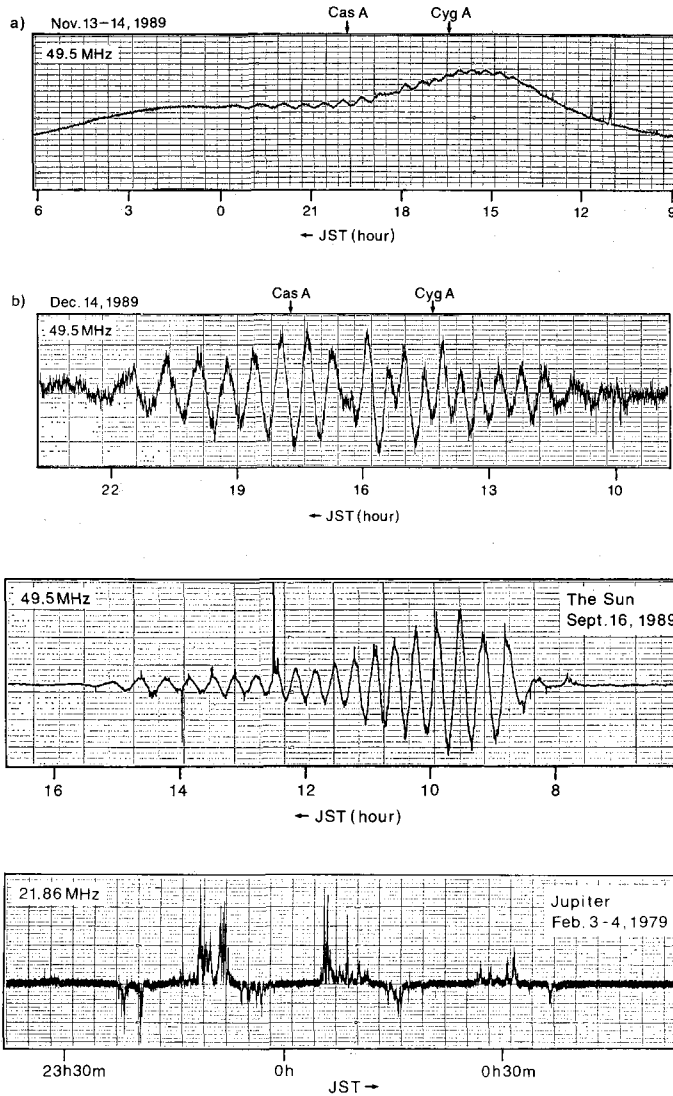


図 9 干渉計によるシグナス A (Cyg A) およびカシオペア A (Cas A) の観測。
a) 加算型干渉計の記録
b) 乗算型干渉計の記録

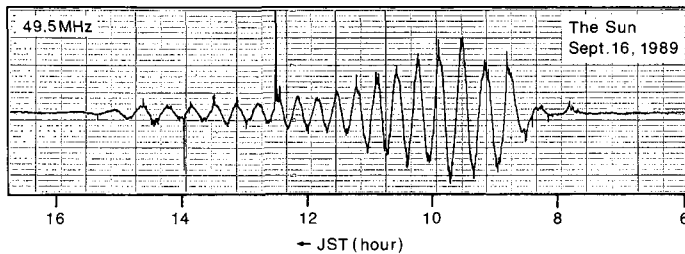


図 10 乗算型干渉計による太陽の観測

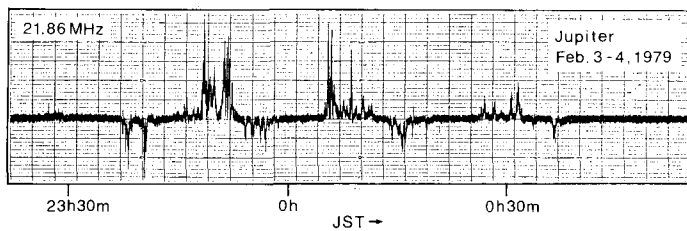


図 11 乗算型干渉計による木星の観測

が異なるので干渉パターンの山の間隔がカシオペア A の部分とシグナス A の部分では異なっていることに注目してほしい。電波源の方向を考慮してシミュレーションを行うと観測されるのと同様のパターンとなることがわかる。

図 10 は太陽を乗算型干渉計で観測した記録である。干渉パターンを描いているのは太陽の準定常的な成分である。実際に観測してみると、黒点領域の発達ぐあいによってこの成分の強さは大きく異なる。図 10 でも、9 時 30 分頃をピークとして振幅が大きくなっているが、これは、コロナの中で何かゆっくりとした活動現象があったものと思われる。準定常成分の干渉パターンの上に所々でスパイク状の強い電波が受かっているが、これらは太陽電波バーストである。バーストも干渉パターンの極性にしがっていることに注目してほしい。このことによ

り、太陽電波バーストであることが確認できる。

木星デカメータ波のように、強度が時間的に激しく変動する天体電波の同定には乗算型干渉計が有用である。図 11 は木星電波を乗算型干渉計で観測した記録の例である。周波数は、21.86 MHz、ベースラインは約 13λ である。アンテナは、ダイポール 2 本からなるアレイを使用している。加算型干渉計で観測した場合には、干渉パターンによる変動なのか、それとも、電波源自身の変動なのかを見分けるのは困難である。乗算型干渉計にすると、ベンがフリッジパターンにしたがってプラス側とマイナス側に交互に振れるので、天体からの電波であることが確認できる。

5. AGC について

今回のテーマとは直接の関係はないが、通信型受信機

の AGC について少しふれておきたい。AGC は OFF として、観測中は設定したゲインが変化しないようにして観測するのがベストである。しかし、最近の通信型受信機では、AGC が OFF にできず、FAST と SLOW の切り換えのみとなっているものが多い。そこで、AGC を働かせた場合の影響についてテストを行ってみた。ダイポールアンテナからの出力を 2 つに分け、一方を AGC を OFF にした受信機に、また、もう一方を AGC を FAST あるいは SLOW とした受信機に入力し、2 つの記録を比較してみた。受信機としてはいずれも NRD-525 を用いた。AGC を働かせた場合、強い混信電波があると AGC 回路が働いて中間周波増幅器のゲインを下げる。強い混信の直後にはこの影響が残るので、同じ強度の天体電波が入射しても、AGC を OFF にしている場合にくらべて出力電圧は下がる。しかし、影響が残る時間は SLOW の場合でも 10 数秒程度で比較的短時間であった。混信の程度にもよると思われるが、このようなレベル低下が起こる点に注意を払えば、AGC が OFF にできない受信機でも観測に使用できると考えられる。

6. 連載を終わるにあたって

これまで述べたのは、周波数範囲 20~50 MHz での観測である。この周波数帯で主に問題となるのは混信である。周波数が高くなるほど混信は少なくなるので、木星以外は、50 MHz 付近で観測するとよい。特に、今回述べた 50 MHz 付近での干渉計による観測は、電波天文観測に対する理解をふかめるのに役立つと考えられる。位相検波回路等の詳しい資料が必要な場合は著者まで問い合わせさせていただきたい。現在、太陽の活動が盛んな時期に当たっており、太陽電波を観測するチャンスである。電波では主にコロナでの活動現象が観測される。光と電波の両方で同時に観測を行うと、活動現象を色々な高さで観測することができ、現象を立体的に考察する上で有益である。太陽バーストのモニター観測は、自作のダイポールあるいは市販の八木アンテナで 50 MHz 付近で行うとよい。記録装置としてはペンレコーダのみについて述べたが、現在は、パソコンが普及しているので、パソコンへのデータ取り込みを考えてもよい。A/D 変換器や制御ソフトも比較的安価に手にはいるようになっていく。コンピュータ制御が可能な通信型受信機もある (NRD-525 もそうである)。パソコンにデータが取り込めれば、データの表示に柔軟性をもたせられるのが利点である。

144 MHz, 430 MHz, 1.2 GHz にもアマチュアバンドがある。周波数を上げるとアンテナがコンパクトになり、取り扱いやすくなる。また、干渉計の観測も狭いスペースでできる。パラボラアンテナや性能のよいプリア

ンプも市販されている。連載最後の原稿を書きながら、市販の機器によりまだまだ色々なことができるの思いを新たにしている。

私の記事を機会に、多くの方が実際に天体電波の観測を体験されるようになることを期待しつつ私の連載を終わりたい。長い間、つたない文章にお付き合いいただいた読者の皆様にふかく感謝致します。

謝辞：私の申し出た企画を取り上げていただいた天文月報編集部にふかく感謝致します。特に、吉澤正則、長谷川哲夫の両氏にはお世話になりました。観測については、空電研究所の渡辺 堯氏より多くの助言を得ました。また、木星の観測では、京都府瑞穂町水呑区の方々、瑞穂町賀美の山田隆二氏に多大の便宜を図っていただきました。現在は、三重県柘植町において、余野郡建材株式会社土地をアンテナ設置のため使用させていただいています。佐藤輝夫教授はじめ兵庫医大物理教室のスタッフの協力も欠かせませんでした。そのほかにもここには書ききれない多くの方々の援助のおかげで観測を続けてこられました。この機会にお世話になったすべてのの方々に感謝致します。

× ×

訂正：1月号 15 ページ。“アメリカ暦”を“The Astronomical Almanac”と訂正します。

ASTRO Observatory Domes

天文台の建設は青少年の 未来の心をはぐくみます



★文部省宇宙科学研究所天文台の6mドーム★

◆主な天体観測ドーム納入先◆

文部省宇宙科学研究所／東京大学教養学部／宮崎大学教育学部／東京学芸大学／埼玉大学／福島大学／川崎市青少年科学館／杉並区立科学教育センター／駿台学園一心荘(北軽井沢)／防衛大学／東海大学宇宙情報センター(熊本)／栃木県こども総合科学館／日原天文台(島根県)等の他全国に 200 余基の実績、

ASTRO 光学工業株式会社

〒170 東京都豊島区池袋本町2-38-15 ☎03(985)1321