

サブミリ波干渉計への挑戦

井 口 聖

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: s.iguchi@nao.ac.jp



長い歴史がある電波干渉計の世界においても、これまでに考慮していなかったロスや、これまでの解釈の誤りが見つかることがある。そして、アルマ望遠鏡のシステム設計の中でもそれはあった。本稿では、サブミリ波干渉計を実現するために、克服すべき技術的課題やシステム設計上で不可欠な基本性能を導くために新たに見いだした原理・解釈について述べる。

1. なぜ電波干渉計？

電波干渉計が現在の姿にたどり着くまでには、長い期間をかけたさまざまな検討そして開発の歴史があったことは言うまでもない。観測したときに得られる天体画像の分解能（解像度のようなもの）は、観測波長÷アンテナ口径に比例する量で決まる。この値が小さければ小さいほど細かいものを撮像することができる。そのため、波長が長い電波での天文観測は、光やX線に比べ、より大口径の望遠鏡を必要とする。しかしながら、大口径の望遠鏡を作るためには技術的・物理的限界が必ずくる。そこで、干渉計が必要となる。干渉計では、二つの素子アンテナ間の干渉縞（フリッジ）を検出することで、そのアンテナ間の距離に相当する口径の望遠鏡と同等の空間分解能を実現できる。例えば、地球の端と端にアンテナを置いて同一天体を観測すると、地球直径サイズの望遠鏡に匹敵する空間分解能を持つ望遠鏡を誕生させることができる。

2. 究極の電波干渉計を求めて…

2素子のアンテナだけでは、観測対象天体の位置やそのサイズを決める程度のことしかできず、鮮明な天体画像を得ることはできない。この問題

を解決したのが、1940年代後半頃から研究成果が報告され始め出した Martin Ryle 氏が考案した開口合成法である¹⁾。彼の発想のポイントは、「地球から星や銀河を観測すると考えるのではなく、“観測対象となる”星や銀河から地球上の望遠鏡（アンテナ）の動きを見る」という発想の転換にあった。図1に示すように、観測する対象から地球上のアンテナの動きを見たとき、複数のアンテナが地球の自転によって本来アンテナが設置されていないところを移動したかのように見え、最終的には綺麗な一つの望遠鏡に近づくことがわかる（注意：図1は直感的イメージで理解するために作成したものであり、実際はアンテナ間の距離の動きをベクトルで考え、それらをUV平面上に展開し考える）。これにより、電波でも高空間分解能での撮像観測が実現できるようになり、電波干渉計は一躍注目される天文観測装置となった。代表的な電波干渉計望遠鏡として、1980年代に完成したアメリカ合衆国のニューメキシコ州の標高約2,000 m サンアウグスティン平原に口径25 m アンテナ27台で構成された究極のセンチ波干渉計 VLA (Very Large Array) などがある²⁾。2000年代になり VLA はさらに性能拡張が行われ、Expanded VLA (E-VLA) として2010年から観測開始予定である。そして、究極のミリ波サブミリ波

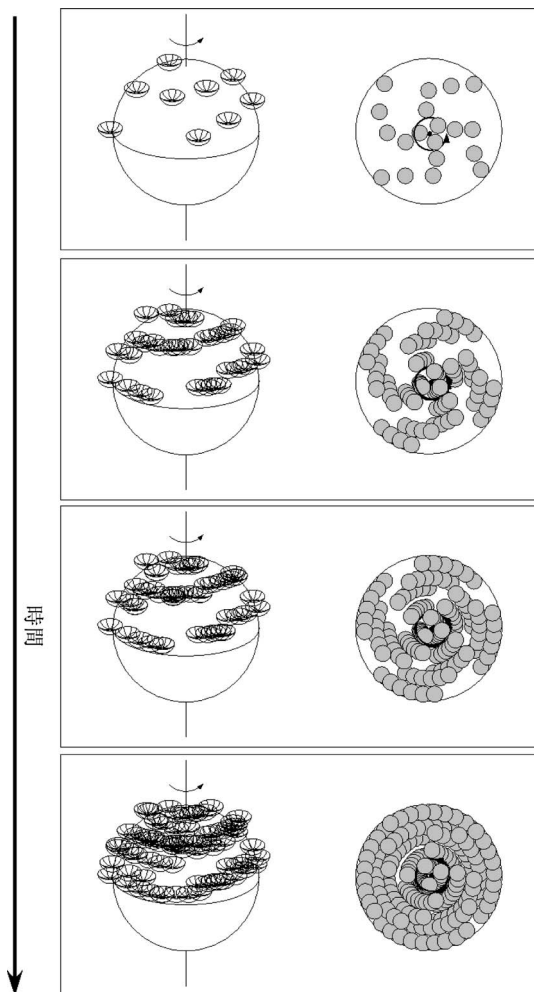


図1 自転でアンテナが動いた軌跡を地球上にプロットした図。

干渉計を目指した望遠鏡アルマ計画が現在建設されており、2010年代には、われわれの宇宙観をさらに深めることが期待される観測装置として始動する³⁾。

3. サブミリ波干渉計

サブミリ波電波干渉計を実現するにあたり、主要な技術開発として、1. システム設計（感度計算算法の確立、最適化）、2. 高精度アンテナ（鏡面精度、指向精度、経路長）、3. 低雑音受信機（検出器）、4. 高安定周波数標準システム（時刻と位

相安定度）、そして5. 多素子広帯域高分散相関処理システム（分光）がある。一方、クオリティの高い開口合成イメージを実現するために、6. アンテナ・アレイ配列の最適化、7. 大気位相補償技術の確立、そして8. 高精度振幅校正手法の確立などが必須である。

この間、行った主たる研究の一つとして、「感度計算法の確立」がある。アルマのような究極の性能を求めた望遠鏡計画において望遠鏡の実力感度をしっかりと押さえることは、観測性能とその製造コストの最適化を行うために必須であった。また、アルマ望遠鏡計画の日本分担である「アタカマ・コンパクト・アレイ (ACA: Atacama Compact Array)」の設計の陣頭指揮を川邊良平氏とともに行い、広視野高解像度イメージの実現に向けた設計検討も行った³⁾。さらに、次世代の多素子広帯域高分散相関処理システムとして、性能を低下させずに物量を小さくする「新たな相関処理アルゴリズム」の検討と装置開発を行った。日本天文学会2009年春季年会 研究奨励賞受賞講演ではすべて紹介させていただいたが、本稿では「ACA」については割愛させていただく。

4. 干渉計感度計算法の確立

電波干渉計の有名な感度計算式として、 $\rho \cdot \sqrt{2BT}$ (ρ : 相関係数、 B : 帯域幅、 T : 積分時間) がある⁴⁾。現在は当たり前のように使われている公式であるが、特に $\sqrt{2BT}$ の $\sqrt{\quad}$ 部分に違和感をもたれる方がいると思われる。なぜならば、ナイキストの定理から $\sqrt{2BT}$ となるのは当然であるが、干渉計の場合は二つのアンテナで受信した信号間の相関係数が最終観測出力であるので、2乗されて $\sqrt{\quad}$ が取り除かれるのでは？と感じるからである。ここでは、これ以上この問題については述べないが（読者の興味として考えてもらいたい）、このような問題を一つずつ解明することは、干渉計の発展に欠かすことのできない研究であったことは言うまでもない。

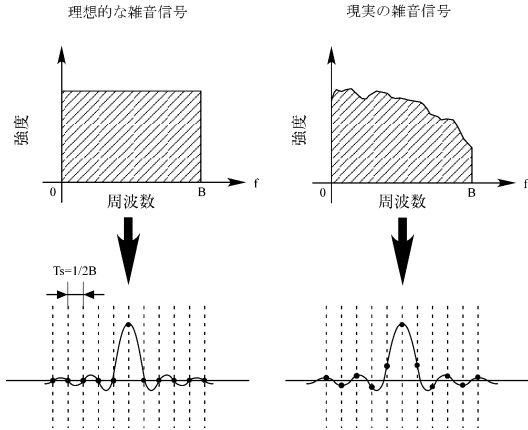


図2 サンプル間の独立性の評価。左：理想的な雑音信号におけるサンプル間は完全に無相関である。右：現実的な周波数特性をもつ雑音信号ではサンプル間の独立性が保てなくなる。

4.1 雑音と雑音でも相関がある

干渉計感度公式 $\rho \cdot \sqrt{2BT}$ は、フラットな周波数特性をもつ雑音（周波数特性をもたない）が想定されており、現実的でない。そのため、観測結果との間で10%から最大50%程度の差を生むことが多々ある。一方、フラットな周波数特性をもたない雑音とは何か？と考えた場合、連続するサンプル間に系統的な独立性を失うことを意味する(図2)。つまり、無相関になるべき雑音信号であっても、その雑音信号が次のサンプルに染み出すため、独立であるべきサンプル間に相関が少なからず生じることになる。

干渉計の場合は、この問題がさらに複雑化する。相関処理にて、フリンジを検出するために信号成分の位相を止めようと働きかける。しかし、折り返し成分にはさらに倍速の位相回転がかかり、結局のところ消えてしまう。結果、サンプル間の独立性が天体からの信号成分にだけは保たれてしまう特性をもつ。本研究では、干渉計における感度の原理をさらに深く理解できたうえに、その正当性を評価するための観測的検証も行い、実証できた⁹⁾。

また、有限長でしか相関関数を求めることで

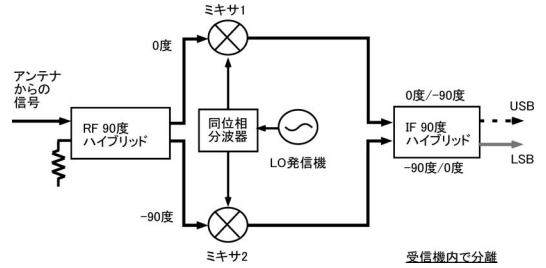


図3 2SB方式。受信機側のみでサイドバンド分離を実施する。対側サイドバンドからの折り返しの影響を取り除ける利点があるが、二つミキサを完全にバランスさせる必要がある。出力信号の片側しか使わない場合がSSB方式。

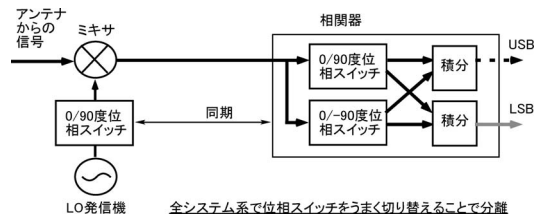


図4 DSB方式。相関器処理過程までを含めた系でサイドバンド分離を実施する。受信機でサイドバンド分離を行わないためIF数を半分ででき、IF数を同じにすれば総帯域を2SB方式に比べてさらに倍にできる利点がある。しなしながら、対側サイドバンドからの折り返しがあるため大気吸収の影響が複雑になる。

ないため、理想的な雑音同士の相関処理でもその相関係数がゼロにならない、つまり相関したかのように見える⁶⁾。当然、これも無視できず、前述に記したサンプル間の独立性問題と複雑にからみ合う。

4.2 受信方式ごとの検出感度の違い

SIS ミキサが搭載されるミリ波より短い波長では、現在、大きく分けて次の三つの受信機システムが考案されている。それらは1: Single Side Band (SSB) 方式, 2: Two Single Side Band (2SB) 方式(図3), 3: Double Side Band (DSB) 方式(図4)である。サブミリ波帯では大気の影響が厳しく、これらの方式によって検出感度に大きな差が出てくることは間違いない。そこで、アルマ時代のサブミリ波干渉計実現に向けて、大気の影響

響やシステム上発生する時刻同期のずれ、折り返し雑音の影響（サンプル間の独立性の崩れ）、日周変化によるフリンジ周波数の変化の影響などを考慮した新たな感度計算法をそれぞれの受信機システムにおいて再構築した⁶⁾。この検討の中で、干渉計の名著である Thompson 氏たちが書かれた「Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy」に、DSB 方式における感度の考え方で、“サイドバンドを分離するための 90 度位相スイッチを繰り返して行う際、upper 用と lower 用で切り替えることで、それぞれのサイドバンドの信号が半分になり、感度が $\sqrt{2}$ 分の 1 になる”という解釈があった⁷⁾。しかし、これは大きな疑問を抱く説明である。なぜならば、図 3 と 4 からわかるように、最終的に相関処理される情報量は落ちない、つまり情報エントロピーは落ちていないのである。よって、前述の書籍で記載されているようなロスはない。一方、SSB/2SB 方式に対して、DSB 方式の感度が $\sqrt{2}$ 分の 1 で落ちることは、実験観測により実証されていた。

そこで、改めて、一から干渉計における感度公式導出の解析的検討を行った。筆者の論文⁶⁾を見てもらえばわかるが、かなり長い計算によってやっとたどり着いた答えは、直感的解釈に合うものであった。それは、DSB 方式の場合、両サイドバンドが 1 系統で相関器まで伝送され、相関処理後に分離されるので、それぞれのサイドバンドに双方からシステム雑音温度が入ってしまい、雑音温度が 2 倍になる。一方、帯域が倍になるので感度は $\sqrt{2}$ 倍を得ることになる。つまり、 $\sqrt{2}/2$ 倍の感度、つまりこれまでと同様の結果になった。ただ大きく違うのは解釈であった。この結果、他の影響など（例えば、90 度位相スイッチの時刻精度誤差や大気位相揺らぎ）によるロスをより確実に理解でき、正確に見積もることができるようになった⁶⁾。ちなみに、前述の書籍の最新 Edition では修正が入っている。

5. 多素子広帯域高分散相関器の実現

電波干渉計における多素子高分散相関処理システムの手法として、大きく分けて二つのタイプがある。まず相互相関をとってからフーリエ変換して分光する手法の XF 型⁸⁾と、最初にフーリエ変換してから積算する手法の FX 型がある⁹⁾。より高い周波数分解能の実現には、XF 型の場合は相関係数を求めるときのラグ τ を、FX 型の場合はフーリエ変換の点数 N を大きくすることで可能となる。FX 型相関器では、FFT（高速フーリエ変換）を採用することで周波数点数が $N \cdot N$ から $N \cdot \log_2(N)$ に削減でき、これに比例して物量を小さくできるメリットが指摘されてきた⁹⁾。ところが、FXF 型相関器（デジタルフィルタを用いたハイブリッド型 XF 相関器）の登場で、この FFT による FX 型相関器の利点がなくなってきた。一方、FFT 効果で物量が小さくなると思われてきたが、コスト面からも、その効率面があまり見えない現状もあった。そこで、FFT の $N \cdot \log_2(N)$ の効果を改めて検証した。

FX 型で高分散分光の実現のためには、FFT の周波数点数 N は、アルマ時代になると最低でも 1 M (2^{20}) 点以上は必要である。一方、これだけ大きな周波数点数になると、一つの LSI（大規模集積回）に多点数の FFT をすべて内蔵することができない（集積度がより高い LSI が登場しても、さらに高い分散が求められ、この関係はなかなか崩れない）。そこで、FFT を分割して、二つ以上の LSI で処理する方法が取られる。例えば、2 分割構成の場合、必要となる演算は、 $N \cdot \log_2(N)$ ではなく $N \cdot \log_2(N) + N$ となり、 N が加算される。そして、さらに FFT 後の積算部も、周波数点数 N に比例して大きくなり、ALMA のような多素子干渉計になると無視できないほどさらに大きくなる [$\text{Ant} \cdot (\text{Ant} - 1) \cdot N \cdot N$ で増える（Ant はアンテナ素子数）]。一方、FXF 型相関器は、XF 型分光処理を行う前に、いったんデジタルフィルタを

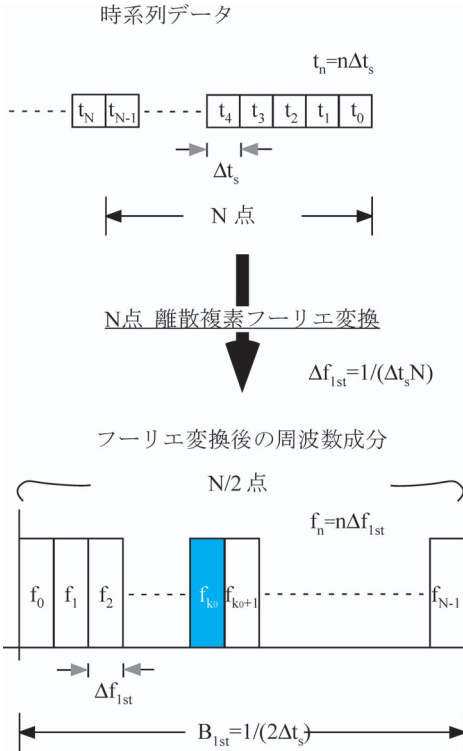


図5 フーリエ変換. フーリエ変換は、フーリエ変換後の任意の周波数成分の一つを選ぶことで、フィルタリングと等価の機能を有することができる。

使って処理しやすい速度まで落とす。当然、入力の広帯域な信号を維持するためにフィルタバンクをもつ必要があるが、デジタルフィルタ出力の信号は十分に速度が落ちていることで後段の相関処理のためのLSIに機能を集積化しやすくなる。例えば、32分割のデジタルフィルタバンクの場合、 $Ant \cdot (Ant - 1) \cdot (Tap \cdot 32 + N \cdot N / 32^4)$ となり、相関処理時のためのLSIの物量をかなり小さくできる (Tap: デジタルフィルタの段数)。結果、アルマで採用された FFX 型相関器と FX 型相関器の間で大きなコスト差が生まれなかった。これは FX 型の利点が完全に見えないことを意味する。

そこで、さらなる FX 型相関器の可能性を見出すために、新たなアルゴリズムの検討に乗り出してしてみた。FFX 型と同様なデジタルフィルタを

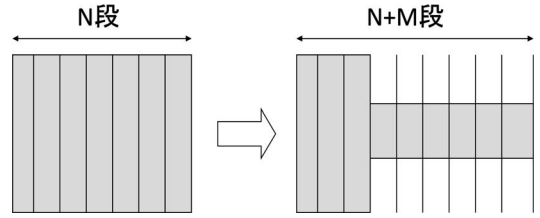


図6 FFXの発想のポイント. 後段のResourceを特定の帯域に振り分けることで、さらに分光点数(フーリエ変換の段数)を上げることができ、(N+M)段の高分散分光を実現できる。

用いる方式もあるが、やはりFX型相関器である以上、フーリエ変換を基本で考えてみた。そもそもフーリエ変換とは何か？ それは周波数フィルタとも言える (図5)。つまり、分光された1点1点はその周波数分光された帯域幅のフィルタ出力であると考えられることができる。さらに、その分光された任意の点のデータを時系列に並べ直してフーリエ変換すれば、さらに処理速度も低下しているので容易に高分散が可能となる。図6に示したように、一つのLSIに内蔵されている有限の回路を効率的に利用することで、高分散を実現できるようになる。FFX型相関処理前に、フーリエ(Fourier)変換フィルタを置く、このような相関器を、筆者はFFX型相関器と命名した¹⁰⁾。これにより、FX型で実装されたときに、どうしても存在してくる $N \cdot \log_2(N) + N$ の N を取り除くことができ、本来のFXの特徴である $N \cdot \log_2(N)$ で物量を表現できるようになる。

6. むすび

長い年月をかけて検討・研究されてきた電波干渉計の分野でも、まだまだ原理的検証が深く行われていないことがあるであろう。現状の観測結果と比較すると、設計に大きな見落としはないのかもしれないが、小さなものがまだある。それらがいくつか集まれば、実観測との間で簡単に2倍程度の違いは生まれてくる。望遠鏡性能の向上とそのコストが増大していく昨今の情勢を考えると、

この差を埋めることは大事である。まして、さらに短い波長になれば、設計感度と実性能の間に1桁の差が生まれる可能性がある。今後、干渉計技術は電波から赤外線や光に展開されていく。特に、大口径化が難しい赤外線領域では干渉計は魅力的な手法の一つであろう。一方、天文観測装置として、良質なイメージを出すという目的を求められる時代であるだけに、アレイ化は必須である。電波分野のみならず他の波長でも干渉計手法が扱われる時代に突入し、電波干渉計で歩んだ道のりと同じ量と質の検討を乗り越えることは必至である分、まだまだ干渉計の研究は奥が深く面白く、そしてさらに発展していこう。

謝 辞

本研究を行うにあたり、干渉計原理に関する議論を常日頃から付き合っていたいただき、多大なインスピレーションを与えていただいた国立天文台の川口則幸教授、また多素子広帯域高分散相関器の実現に向けて激論を交わさせていただいた国立天文台の近田義広教授、サブミリ波干渉計の実現に向けて、日々議論を交わさせていただいてきた国立天文台の長谷川哲夫教授、川邊良平教授、石黒正人名誉教授、関本裕太郎准教授、齋藤正雄助教、そして東京大学の河野孝太郎教授に、本稿にて改めて心から厚く感謝の意を述べさせていただきたいと思います。

参 考 文 献

- 1) Ryle M., 1975, *Science* 188, 1071
- 2) Thompson A. R., et al., 1980, *ApJS* 44, 151
- 3) Iguchi S. et al., 2009, *PASJ* 61, 1.
- 4) Rogers A. E. E., 1976, *Academic Press (New York, USA)*, 12, 139
- 5) Iguchi S., Kawaguchi N., 1999, *IEICE Trans. J82-B*, 420
- 6) Iguchi S., 2005, *PASJ* 57,643.
- 7) Thompson A. R., et al., 2001, *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, New York)
- 8) Weinreb S., 1963 (R. L. E., MIT, Cambridge, Mass.), *Tech. Rep. No. 412*
- 9) Chikada Y., et al., 1987, *Proc. IEEE* 75, 1203
- 10) Iguchi S., Okuda T., 2008, *PASJ* 60, 857

Design of Submillimeter Interferometer

Satoru IGUCHI

National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Unexpected loss and misinterpretation are sometimes found even in the field of radio interferometry that has a long history. Actually, these things occurred in the system design of the ALMA telescope. In this paper, I describe various technical challenges to overcome for the realization of a new submillimeter array as well as principles and interpretations newly derived in the effort to achieve the basic performance essential for the system design of ALMA.