

アンデスの巨大電波望遠鏡 ALMA と光技術

上田 暁俊・石黒 正人

Photonics Technologies for ALMA, a Giant Radio Telescope in Andes

Akitoshi UEDA and Masato ISHIGURO

New technologies in optics and photonics are required in the giant radio telescope ALMA (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array) which is planned to be constructed at a 5000-m site in Chilean Andes. We are developing a photonic local oscillator with a UTC-PD (uni-traveling-carrier photo diode) for the ALMA. A signal at millimeter and submillimeter wavelengths are produced with the UTC-PD by mixing two laser signals at different frequencies. We have designed a W-band waveguide (75-110 GHz) mixer for the UTC-PD. This paper presents preliminary results of this W-band waveguide photonic local oscillator. The output power measured was -1.5 dBm at 100 GHz that is highest power reported so far.

Key words: millimeter wave, submillimeter wave, interferometer, photonics, UTC-PD, ALMA, photo-mixer

本屋の天文学のコーナーを覗くと、多種多様な写真集が販売されている。それらの本には、さまざまな色で輝く星、銀河、爆発が起きガス等がものすごい勢いで飛び散って行くさまが映し出されている。星空の彼方でいったい何が起きているのだろうか。知りたい。これはきっと人類が太古から思い続けてきた疑問であろう。望遠鏡技術の発達のお陰で人類は何億光年も離れた所で起きている現象を観測できるようになった。望遠鏡の分解能は観測波長を λ 、望遠鏡の口径を D として、 λ/D で表される。望遠鏡の口径を大きくまた観測波長を短くしていけば、より精細な構造を知ることができるが、実際には構造物のため大きさに限界が生じる。すばるのような光学望遠鏡と同じ解像力を得ようとすると、ミリ波では数キロメートルもの口径を必要とする。このような大口径の解像力を得るために、複数台の小型アンテナで同一天体を観測し、受信した電波の干渉（相関）を観測する方法があり、これを電波干渉計という。現在、ミリ波～サブミリ波で世界最大の巨大望遠鏡 ALMA (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array) の建設が計画されている。本稿ではこの ALMA に関連した光技術について紹介する。

1. ALMA 計画の概要

ALMA は、日・米・欧の 3 極国際協力により 12 m 級の高精度アンテナ約 80 台を南米チリ・アンデス 5000 m の高地に展開する巨大電波望遠鏡計画である。ミリ波・サブミリ波の水分子による吸収をさけるために、非常に乾燥し、山頂がほとんど平坦であるこの高地が、望遠鏡建設地として選定された。最大基線長は 14 km であり、解像力は 0.01 秒角に達する。一周が 34.5 km の山手線線路上にパラボラアンテナが設置されているところを、想像していただきたい。この解像力は、既存ミリ波干渉計感度の 100 倍、すばるの 10 倍である。サブミリ波での観測性能を達成するために、アンテナには非常に厳しい要求がされている。口径 12 m に対し鏡面精度は $20 \mu\text{m}$ rms 以下、指向精度 $0.6''$ rms 以下、等である。ミリ波・サブミリ波領域では、軽い分子の輝線観測を行うことができ、星や惑星系の形成や銀河の進化の研究において多くの成果が期待される。観測周波数は 30~950 GHz であり、大気吸収の少ない窓に対応して、10 の観測周波数帯に分割される。それぞれの観測周波数帯に対し、1 個ずつの受信機カートリッジが作製され、冷却デューワーに実装される。10 バンドの受信機をアンテナに実装

表1 局部発振器基本仕様.

周波数範囲	比帯域	周波数分解能	出力	信号伝送距離	電気長安定度
30~950 GHz	1.2	3×10^{-8} 以下	100 μ W 以上	10 km 以上	10 μ m/分

するためには、大きさに厳しい制約があり、カートリッジの大きさは直径 20 cm, 長さ 50 cm 程の円柱である。この内部に、光学系、偏波グリッド、ミキサー、ローカル等が入れられる。ミキサーには超伝導ミキサーが使用されるため、冷凍機で 4 K まで冷却される。

2. ALMA に応用される光技術

2.1 フォトニクス技術によるサブミリ波発生

ALMA 計画では、光技術が非常に重要な役割を担うことになる。まず始めに、ミリ波・サブミリ波局部発振器、フォトリックローカルについて紹介する。レーザーにおいては、さまざまな固体(結晶)、半導体、色素が開発されており、光領域ほぼ全域で、良質な(高周波数純度、出力安定、高出力)レーザー発振が可能となっている。特にチタンサファイアレーザーは、1 台で 650~1150 nm の周波数可変領域を取ることが可能である¹⁾。いっぽうミリ波・サブミリ波領域では、ガン発振器と逡倍器を組み合わせた方法が主流であり、十分な波長可変帯域を取れていない。一部、

分光学では、CO₂ レーザーの差周波、CO₂ レーザー変調サイドバンド、BWO (backward oscillator), Gyrotron, 等が使用されている。しかし、これらの方式は、テーブルトップで分光を行うことはできても、遠方へ信号を供給することはできず、アンテナが 10 km 以上離れる ALMA の局部発振器には適さない。干渉計計測では、各アンテナ間で天体信号をミキサーで周波数変換する際に、局部発振信号の位相関係が安定である必要がある。そのため、局部発振信号は無中継でアンテナまで伝送されることが望ましい。この電波干渉計で局部発振器に要求される性能を表 1 に示す。この周波数を発生させるだけであれば、電波天文学で一般に行われているガン発振器の逡倍でも十分可能である。しかし、この方式の場合、比帯域が取れない(~1.1)、冷却可能逡倍器が必要である、複数段の逡倍器を冷却ステージに乗せる必要がある等の問題がある。そこで、光を使った局部発振器(フォトリックローカル)の開発が進められている。フォトリックローカルでは、周波数、位相安定化を行った 2 波長のレーザー信号を混合し、差周波が局部

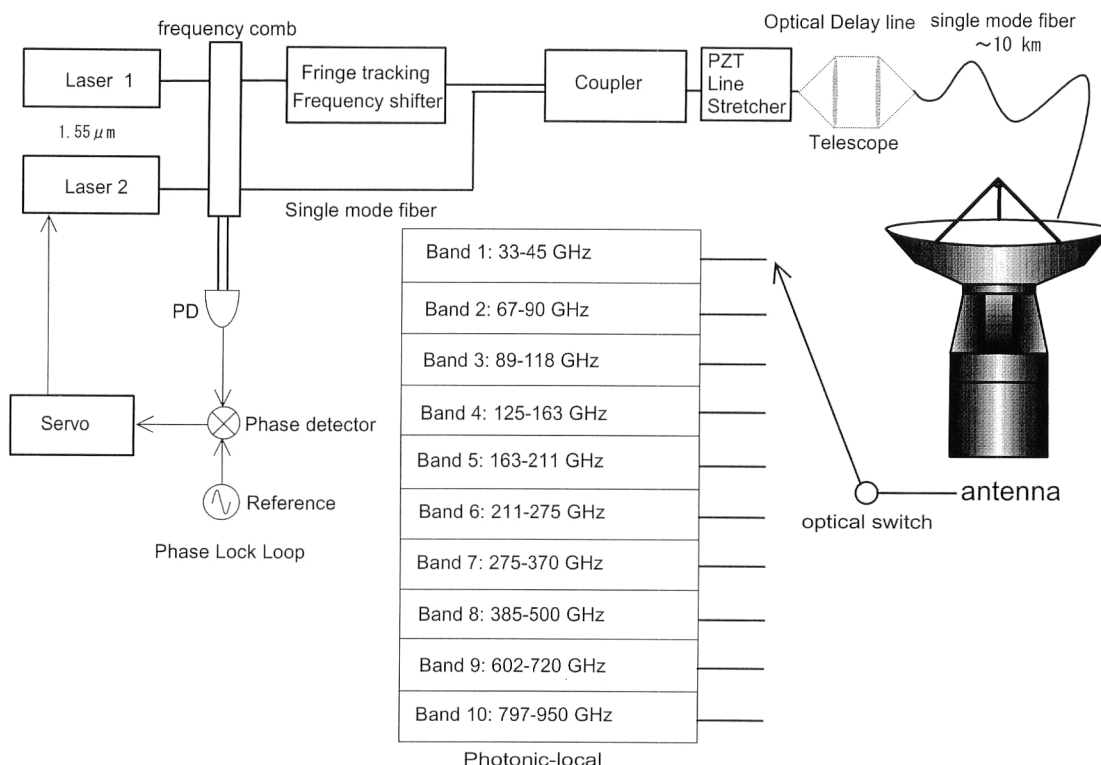


図1 ALMA フォトリックローカルシステムの模式図。使用レーザー波長は 1.55 μ m。フォトリックローカルの周波数帯域は 33~950 GHz。

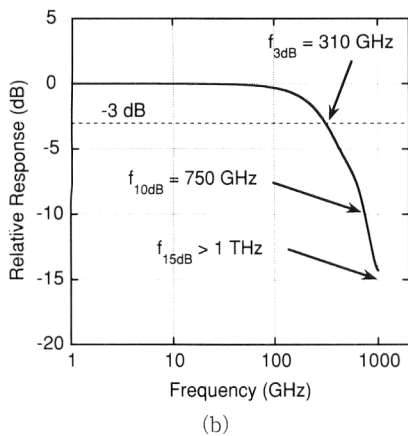
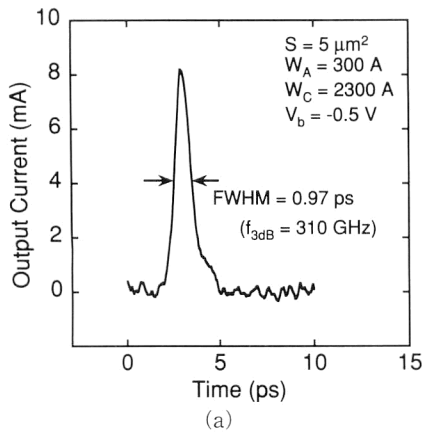


図2 (a) UTC-PDのパルス応答. パルス応答の半値全幅は0.97 ps. (b) (a)のフーリエ変換波形.

発振信号となるよう、各アンテナへ共通の光信号を分配・伝送する。各アンテナには、観測帯域に合わせた、フォトミキサーが設置されており、2台のレーザーの差周波から、周波数変換に必要な局部発振信号を得る。ここで用いる光の波長は、光通信で用いられている1.55 μm であり、周波数は約200 THzである。この波長域で、周波数を1 THz振った場合の波長変化はたかだか7.5 nmであり、これは半導体レーザーの波長可変域内である。アンテナ部を含めた、フォトニックローカルの全体概念図を図1に示す。日本の提案は ~ 1 THzまで直接フォトニック方式で局部発振信号を発生させることであるが、当面は350 GHz帯に第一段階の目標を置いている。それ以上の周波数については、フォトニックローカルで発生させた350 GHzの信号を逡倍する方法と、十分な出力が得られれば直接フォトニックで1 THzまで発生させる方法が検討されている。350 GHzまでの実験結果を基に、どちらを選択するかが決定される。この方式で要となる技術のひとつは、フォトダイオードである。ここで使用されるフォトダイオードは、高出力かつ、超高速応答でなくてはならない。現在、われわれの要求値を満たす可能性のあるフォトダイオードとして、NTTフォトニクス研究所で開発を行っているUTC-

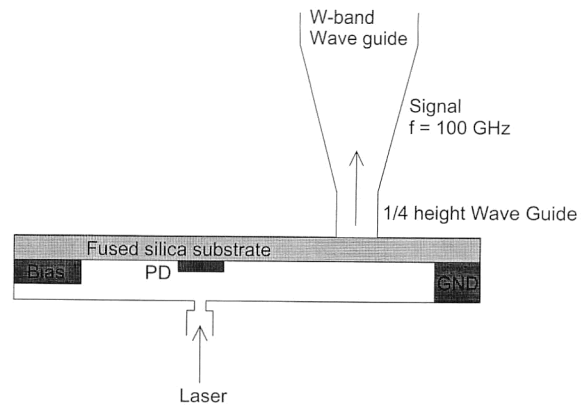


図3 導波路組み込み型 UTC-PD の模式図.

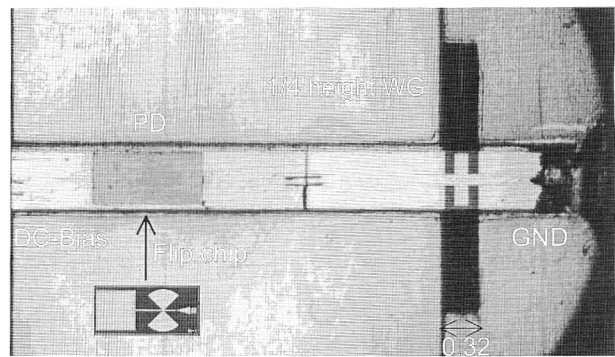


図4 導波路組み込み型 UTC-PD の写真.

PDがあり、このフォトダイオードを用いて、フォトニックローカルの開発を行っている²⁾。半導体中でのホールの移動度は、電子と比べると低く、これが従来型 (PIN) フォトダイオードの応答速度を制限している。そこで、NTTでは電流キャリアとして電子のみを使用する UTC-PD を考案し、超高速応答フォトダイオードの開発に成功した。このフォトダイオードのパルス応答を図2(a)に示す。図2(a)のフーリエ変換は図2(b)のようになる。-3 dB点は310 GHzであり、900 GHzにおいても、15 dBしか出力が落ちないので、サブミリ波帯での信号発生が可能である³⁾。フォトニックローカルでは、このフォトダイオードを導波管に実装する方式やログペリアンテナとレンズによる準光学方式によりミリ波 \sim サブミリ波出力を得る。導波管方式のミリ波用フォトミキサーの模式図を図3に示す。UTC-PDチップは石英基板にフリップチップで接着され、割導波管に実装される。実装写真を図4に示す。UTC-PDと導波管の結合部分で生じる反射損失は、W-bandの75 \sim 110 GHzで計算により、-15 dB以下と見積もられており、フォトダイオードで発生した信号は、ほとんど損失なしに、導波管に結合する。2台のレーザーから出た光は、3 dB結合器で1本のファイバーに入り、集光レンズにより、割導

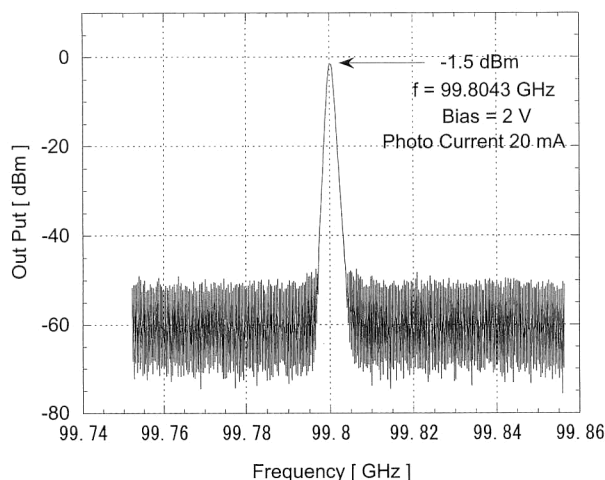


図5 フォトニックローカル信号。導波管出力は-1.5 dBmであった。

波管内部のフォトダイオードに照射される。導波管からの出力は、ハーモニックミキサーとスペクトラムアナライザにより測定した。このとき得られる信号を図5に示す。周波数 100 GHz で -1.5 dBm の導波管出力を得ることに成功している。このとき、フォトダイオードを流れる光電流は 20 mA であった。

2.2 位相安定化光信号伝送路

フォトニックローカルに使用する基準光源は中央の制御棟に設置され、そこからそれぞれのアンテナへシングルモードファイバーで伝送される。この光源は、高精度な差周波基準に対して、位相安定化されている必要がある。ファイバーの長さは~10 km である。アンテナ間のファイバーに相対的な温度差 1 度が生じた場合、光路長変化が~10 cm 程生じる。したがって、この伝送路に対して往復のフェーズロックループを組み、各アンテナに供給されている光位相を一定に保つ必要がある。ファイバー長制御の模式図は図1を参照されたい。ピエゾラインストレッチャーはピエゾドラムにファイバーを巻き付けたものであり、制御帯域は~数キロヘルツ、ダイナミックレンジは 100 μ m 程度、ファイバーの長期ドリフトは、エアギャップを用いて制御する。エアギャップではシングルモードファイバーから出た光をいったん平行光にし、再度シングルモードファイバーへ結合させる。したがって、非常に高精度な光学系を設計する必要がある。

離れて設置されている各々のアンテナは、地球の自転その他によって周波数のドップラーシフトや干渉縞の位相シフトが生じる。したがって、各アンテナごとに独系ドップラートラッキングおよび位相トラッキングが必要となる。この目的のためには、シングルサイドバンド変調器が応用できる可能性がある。近年の光回路の発展には目を見張る

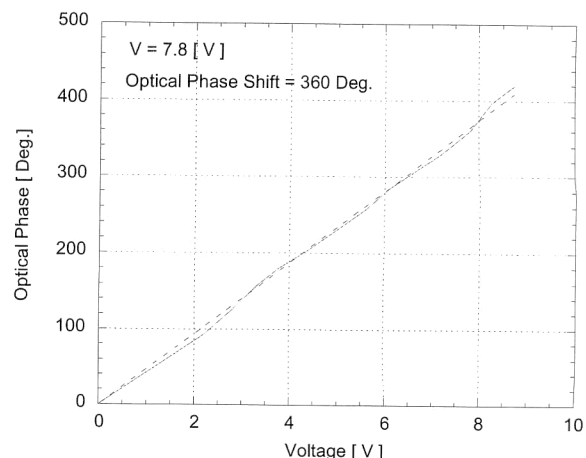


図6 電気光学位相変調器による光位相特性。印可電圧 7.8 V で位相 2π 変化させることが可能である。

ものがあり、キャリア抑圧型周波数シフターを開発することは十分に可能であると考えられる。 2π 位相シフターについては、変調領域を大きく取ることができる、進行波型電気光変調器を DC で駆動することにより、 $\pm\pi$ の位相変調を得ることに成功している。図6に測定結果を示す。

シングルモードファイバーで伝送できる光のパワーは、誘導ブリュアン散乱のために制限され、10 km では 10 mW 程度である⁴⁾。この光出力はフォトダイオードの性能を生かすためには不十分である。したがって、アンテナ側に光アンプを挿入する必要があるが、ここで生じる位相ドリフトが問題となる可能性がある。

2.3 広帯域光情報伝送

局部発振信号と天体信号は、超伝導ミキサーを使用してベースバンドに周波数変換され、さらにデジタル信号に変換される。情報量が一番多い偏波観測では、左右円偏波の組み合わせで2出力となり、2~3 ビット \times 16 GHz (総サンプリング周波数) \times 2 出力~100 Gbit/s の伝送能力が必要となる。各アンテナからこれらの信号をまず、アンテナから~10 km 離れた、中央制御棟まで伝送することとなる。中央制御棟に送られたデータは相関器により相関処理が行われ、50 km 離れた山麓施設へ伝送される。光通信技術は、企業で盛んに研究が進められており、情報伝送レートの増加には、めざましいものがある。したがって、最先端の情報伝送技術を使用すれば、アンテナからの情報伝送の問題については解決可能であると考えている⁵⁾。

2.4 アンテナ姿勢計測

アンテナは口径 12 m と大きい、非常に繊細であり、数十 μ m のゆれやたわみがあると、本来の性能を発揮できなくなる。特に、アンテナの主鏡面を支えるための、ヨーク部分の変形はアンテナの指向精度に大きく影響する。こ

の部分の変形については、4分割フォトディテクターとレーザーを2組用いて計測する予定である。アンテナの指向精度を計測する一手段として、光ポインティングが使用される。主鏡面部に搭載した光ポインティング用の屈折望遠鏡と CCD カメラで星の位置を計測する。アンテナの姿勢を変えて多数の星を観測することにより、アンテナの傾き、エンコーダー誤差等の指向誤差を計測することが可能である。この方法は電波での基準天体が少ないサブミリ波波長帯では大変有効な方法であるが、昼間の測定が困難である欠点がある¹⁾。

電波望遠鏡と書くと、光とは関係なさそうに思われがちであるが、実際には光技術と密接な関係をもっている。しかも、そこで要求されている技術レベルは、最先端の光技術をさらに、発展させなければならない程であり、電波天文学からの要求が、光学の進歩に寄与することが起こりうる。現在開発を進めている、フォトリソグラフィは、電波望遠鏡の局部発振信号源としてのみでなく、分光学でも非常に有用な光源となる。また、精密な局部発振信号をレーザーの差周波に乗せて伝送する技術は、非常に高安定な周波数標準を配信可能とする。

フォトリソグラフィの開発は、国立天文台(野口 卓, 岩下浩幸, 高野秀路, 関本裕太郎, 松尾 宏), 宇宙科学研

究所(松浦修二), NTT フォトニクス研究所(石橋忠夫, 伊藤 弘, 枚田明彦), NTT 通信エネルギー研究所(永妻忠夫)の協力により推進されている。本研究は、文部科学研究費補助金の援助を受けて行われた。

また、本研究を進めるに当たり、経済産業省計量研究所、大苗 敦研究員には、有意義な議論を行っていただいた。ここに記して謝意を表する(敬称略)。

文 献

- 1) M. J. Webber: "Solid state lasers," *Handbook of Laser Wavelengths*, Laser and Optical Science and Technology Series (The CRC Press, Boca Raton, 1999) pp. 28-163.
- 2) N. Shimizu, N. Watanabe, T. Furuta and T. Ishibashi: "InPGaAs uni-traveling-carrier photodiode with improved 3 dB bandwidth of over 150 GHz," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **10** (1998) 412-414.
- 3) H. Ito, T. Furuta, S. Kodama and T. Ishibashi: "InP/InGaAs uni-travelling-carrier photodiode with 310 GHz bandwidth," *Electron. Lett.*, **21** (2000) 1809-1810.
- 4) C. C. Lee and S. Chi: "Measurement of stimulated-Brillouin-scattering threshold for various types of fiber using Brillouin optical-time-domain reflectometer," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **6** (2000) 672-674.
- 5) R. C. Alferness, H. Kogelnik and T. H. Wood: "The evolution of optical systems optics everywhere," *Bell Lab. Tech. J.*, January-March (2000) 188-202.

(2001年4月17日受理)

¹⁾<http://www.mma.nrao.edu/memos/htmlmemos/abstracts/abs288.htm>