レーザーオリジナル

CO₂レーザー・ヘテロダイン検波を用いる
2素子赤外干渉計の開発

吉 門 信*・石 津 美津雄*・高 見 英 樹*・浅 井 和 弘**・有 賀 規*

(1992年10月22日 受理)

Development of a Two-Element Infrared Interferometer System
Using CO₂ Laser Heterodyne Detection

Shin YOSHIKADO*, Mitsuo ISHIZU*, Hideki TAKAMI*, Kazuhiro ASAI** and Tadashi ARUGA*

(Received October 22, 1992)

A two-element infrared interferometer system has been developed for basic research of the high-resolution imaging of distant objects at wavelengths around 10 μm . The system is technically based on CO₂ laser heterodyne detection of infrared radiation as well as a wideband analog correlator technique. The baseline length is 2.25m, resulting in the angular resolution limit of about 5 μrad for 10 μm -band radiation. Through preliminary, laboratorial experiments using a CO₂ laser as a test radiation source, we confirmed that the system fulfils its fundamental functions and the performances of its major elements are sufficient for future imaging operation.

Key Words: Infrared interferometer, High-resolution imaging, Laser heterodyne detection, Wideband analog correlator

1. はじめに

近づくことが不可能な、あるいは可能であっても容易ではない遠方にある物体の位置・形状を、離れた位置から高い分解能で観察するために、望遠鏡が用いられる。より高分解能の望遠鏡を求めるニーズは、望遠鏡技術開発の歴史を担ってきた天文学の分野は言うに及ばず、例えば人工衛星の状態観察、スペースデブリの追跡

等を目標とした宇宙開発関連の光リモートセンシング分野等においても、最近ますます増大してきている¹⁾。

よく知られているように、望遠鏡等の分解能(角度分解能)は像を分解できる限界の、近接2点間の角度 $\Delta\theta$ として定義され、その限界値(回折限界)は観測する電磁波の波長 λ と望遠鏡の口径 D によって決まり、ほぼ

* 郵政省通信総合研究所 (〒184 小金井市貫井北町4-2-1)

** 東北工業大学通信工学科 (〒982 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

* Communications Research Laboratory (4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei-shi, Tokyo 184)

** Department of Communication Engineering, Tohoku Institute of Technology (35-1 Yagiyama-Kasumicho, Taihaku-ku, Sendai-shi, Miyagi 982)

$$\Delta \theta \sim \lambda / D \quad (1)$$

で表される²⁾。したがって観測の角度分解能を上げるためには、望遠鏡の口径を大きくするか、またはより短い波長帯を対象として観測を行う必要がある。しかし大口径の望遠鏡の製作は、口径を大きくすればするだけ必要な鏡面精度の確保が困難になること、及び支持・駆動機構の機械的制約等の様々な問題があり、光学望遠鏡では10m、電波望遠鏡の場合でも100m程度が、製作可能な口径の限界である。

干渉計はこの限界を超える方法として、比較的小口径の複数の望遠鏡を適当な距離をおいて配置し、それぞれの受信信号を合成し対象物の像を再生することにより、望遠鏡群の空間的な広がり(基線長: L)に等しい超大口径の仮想的な望遠鏡と等価な、単一の望遠鏡では得られない極めて高い分解能

$$\Delta \theta \sim \lambda / L \quad (2)$$

を得ようとするものである。

電波領域の干渉計はすでに実用段階にあり、

電波天文学³⁻⁵⁾やVLBI(超長基線干渉計)技術⁶⁾による測地等の分野で活躍している。他方、電波領域に対してはるかに波長が短い光領域においては、実用可能な干渉計の実現のために解決すべき技術的課題がまだ多く残されており、各国で研究開発が進められている。

特に欧米諸国においては、基礎的段階のシステムによる実験報告⁷⁾とともに、将来の大規模な赤外干渉計の開発計画⁸⁾まで発表されているが、わが国では通信総合研究所(CRL)が中心となってCO₂レーザー・ヘテロダイン検波を用いる2素子赤外干渉計を開発し、これまでの室内実験によりその基本機能・性能の検証を行ってきた。以下に、開発された赤外干渉計システムの概要を紹介するとともに、室内実験によって得られた基礎的成果等について報告する。

2. 赤外干渉計の原理

干渉計は、実用段階では効率的なデータ取得のため一般に3個以上の望遠鏡(素子望遠鏡)を用いて構成されるが、その基本的機能は2素子の干渉計によって実現することができる。

Fig.1 Schematic diagram of a two-element infrared interferometer. The delay line is adjusted to compensate the time difference of signal reception between two telescopes, so that the time delay $\tau = L \sin \theta_0 / c$ (c : velocity of light) for optical signals from a narrow direction range centered at θ_0 from the vertical.

Fig.1は、2素子赤外干渉計の原理を示す概念図である。基線長 L の距離をおいて配置された2個の素子望遠鏡によって集光・受信された対象物からの赤外光は、各望遠鏡に近接して置かれた検出器(ミキサ)に導かれる。各検出器には、局部発振器(Local Oscillator: LO)CO₂レーザーからのLO光が信号光と位相面を合わせて入力され、ヘテロダイン検波が行われる。検出器の出力として得られる2系統の中間周波数(IF)信号は相関器(Correlator)に送られ、ここで相互相関関数が演算されて、データ処理装置(Data Processor)の記憶装置に記録される。

以下に、特に重要な光(赤外)ヘテロダイン検波と相互相関関数による像再生の原理を要約する。

2.1 光ヘテロダイン検波^{9,10)}

光ヘテロダイン検波においては検出器入射光の電界は

$$E = E_L \exp(i\omega_L t) + E_S \exp(i\omega_S t + \phi) \quad (3)$$

で表され、また入射光パワー P は E^*E に比例する。(3)式右辺第1項はLO光(L で表示)、第2項は信号光(S で表示)の電界を表しており、 ω_L と ω_S はそれぞれの角周波数である。単位時間に入射する光子数は $P/(h\nu_0)$ であり、検出器出力の光電流 I は

$$I = \eta e P / (h\nu_0) \quad (4)$$

ここで、 η ：検出器量子効率、 e ：電荷素量、 h ：Planck定数、 ν_0 ：光の中心周波数である。LO光が信号光より十分に強く、ショット・ノイズに比較して他の雑音成分が無視できる場合には、検出器出力電流中のIF成分(角周波数 $\omega_I = \omega_S - \omega_L$) I は

$$I = 2(\eta e / h\nu_0) (P_L P_S)^{1/2} \cos(\omega_I t + \phi) \quad (5)$$

となり、また信号対雑音比は

$$S/N = \eta P_S (T/B)^{1/2} / (h\nu_0) \quad (6)$$

で表される。ここで、 P_L 、 P_S はそれぞれLO光と信号光のパワーであり、また T ：積分時間、 B ：IF信号帯域幅である。

2.2 相互相関関数による像再生³⁾

Fig.1のように、信号光の到来方向が θ_0 を中心とする、アンテナ(素子望遠鏡)パターンに比較して小さい角度範囲に限定されている時、 θ_0 からの微小なずれを θ で表し、

$$\xi_0 \equiv \sin \theta_0; \xi \equiv \sin \theta \quad (7)$$

とする。光速度を c 、 $\lambda_0 = c/\nu_0$ として、空間周波数 u を

$$u \equiv L \cos \theta_0 / \lambda_0 \quad (8)$$

と単位角度当たりの周波数で定義し、IF信号2の遅延時間 τ を

$$\tau = L \xi_0 / c \quad (9)$$

に調整すると、相関器出力(相互相関関数)は u の関数

$$\begin{aligned} r(u) &= \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(\xi, \nu_0) \\ &\quad \cdot \exp(i2\pi \xi u) d\xi \\ &= \gamma(u, \nu_0) \equiv \text{フリジン関数} \end{aligned} \quad (10)$$

として得られる。ここで、 $\Gamma(\xi, \nu_0)$ は所望の信号光輝度分布関数であり、

$$\begin{aligned} \Gamma(\xi, \nu_0) &= \int_{-\infty}^{\infty} \gamma(u, \nu_0) \\ &\quad \cdot \exp(-i2\pi \xi u) du \end{aligned} \quad (11)$$

のようにFourier変換によって、求めることができる。

Table I Characteristics of the CRL two-element infrared interferometer.

Baseline	Movable pointing-mirror stage
Length	0.25-2.25m
Expected resolution	$\sim 5 \mu\text{rad}$ ($10 \mu\text{m}$ -band radiation)
Element telescopes	10.2cm ZnSe refracting
Local Oscillator	Variable wavelength CO ₂ laser
Tuning	Grating/PZT
Frequency stability	$< 300\text{kHz}$
Power stability	$< 5 \%$
Detectors (D1/D2)	HgCdTe photovoltaic diode
Wavelength band	$7.5\text{--}11.7 \mu\text{m} / 7.2\text{--}11.2 \mu\text{m}$
Cut-off frequency	510MHz/490MHz
Quantum efficiency	73%/70%
Correlator	Analog multiplier type
Bandwidth	500MHz
Dynamic range	33 dB
Minimum delay step	1 cm (Cable length) $\leq 0.4 \mu\text{m}$ (FDA*)

*FDA (Fine Delay Adjuster) can optically interpolate the gaps between minimum steps of the electric delay line assembly.

Fig.2 Optical subsystem of the CRL infrared interferometer. It directs infrared radiation received by two pointing mirrors together with the split beams of a CO₂ laser (local oscillator) to HgCdTe detectors which function as mixers for coherent heterodyne detection. The interval of the pointing mirrors is the baseline length.

3. CRL 2 素子赤外干渉計システム

3.1 システムの概要と特徴

CRL 2 素子赤外干渉計は、素子望遠鏡及びLOレーザーから検出器に到るまでの赤外光信号を扱う光学系、検出器から相関器に到るまでのIF信号を扱う電子回路系、及びこれらを制御するとともに相関器出力のA/D変換と積分、記録、フーリエ変換、像再生等の処理を行うデータ処理系の、三つのサブシステムから構成される。システムの主要諸元をTable Iに示し、各サブシステムについて開発上の要点を以下に述べる。

3.1.1 光学系サブシステム

光学系サブシステムの全体の構成を、Fig.2に示す。これは、次のような要素で構成されている。

基線部

2枚のポインティング・ミラーの間隔、すなわち基線長 L は $0.25\text{m} \leq L \leq 2.25\text{m}$ の範囲で連続可変であり、コンピュータ制御によってこの範囲の任意の数値に、 $1\text{ }\mu\text{m}$ の精度で設定可能とした。(2)式から角度分解能は、 $10\text{ }\mu\text{m}$ の波長帯に対して約 $5\text{ }\mu\text{rad}$ となる。

ポインティング・ミラーによって受信された赤外光は、対称移動ステージ両端の固定ミラー、及びその後方に配置された屈折望遠鏡を経て、検出器まで導かれる。

精密遅延調整器(FDA)

基線部から検出器に到る2系統の受信信号光の光路の一方(Fig.2ではD2側)に、精密遅延調整器(Fine Delay Adjuster: FDA)が挿入されているのは、本システムの特徴の一つである。

コーナ・キューブ・リフレクタ移動ステージをコンピュータ制御のステッピング・モータで駆動することにより、内部の光路長を 400nm ($\lambda/25$)以下の微小ステップで高精度に伸縮させることができる。後述の相関器に内蔵された電気

的遅延装置の遅延量ステップの間を、この光学的遅延装置で補間する方式をとることによって、遅延光路長のダイナミック・レンジを十分大きくすることに成功した。

局部発振器CO₂レーザー

ヘテロダイン検波の局部発振器として用いるCO₂レーザー(LOレーザー)の発振波長はPZTによって選択できる。信号光スペクトラムが連続的である場合は、検出器が有効感度を有する波長領域内であればどの発振線を選択しても、同様の検波出力が得られる。

ヘテロダイン検波に必要なLO光のパワーは $10\sim 100\text{ }\mu\text{W}$ 程度で十分であり、これ以上では検出器を劣化させる恐れもあるので、検出器を劣化させる恐れもあるので、検出器に入射するLO光を必要十分なレベルに調整するために、Fig.2に示すように光減衰器を挿入した。

赤外光検出器

検出器は、入射信号光の観測可能な波長帯や強度範囲、及び出力IF信号の帯域幅や信号対雑音比等の主要パラメタを決定し、干渉計システム全体の性能を左右する最も重要な構成要素の一つである。

出力IF信号の帯域幅は約 500MHz であるが、レーザーを試験用信号光源とする場合を除き、通常の信号光はこの帯域をはるかに超える連続スペクトラムを有しているので、この連続スペクトラムからLOレーザーの発振線の上下両側の約 500MHz ずつを切り取り、中央で折り返して重ね合わせたものがIF信号となる。

3.1.2 電子回路系サブシステム

電子回路系サブシステムは、HgCdTe赤外検出器から出力される2系統のIF信号を増幅し、相互相関関数の演算を行う。Fig.3にその構成を、後述するデータ処理系サブシステムとともに示す。

Fig.3 Electronic and data-processing subsystems of the CRL infrared interferometer. They compute and record the correlation between two IF signals from the HgCdTe detectors, and process the correlation data to yield desired interferometry outputs. The bandwidth of the IF signals is approximately 500MHz. The minimum step length of the delay line assembly is 1cm.

IF増幅部

開発したIF増幅部の特徴は、多段かつ増幅率可変であることである。それぞれ低雑音前置増幅器(利得40dB)を初段として、さらに3個の増幅器と2個の減衰器で構成され、入力信号のレベルに応じて最小40dBから最大150dBまで、10dBステップで増幅率を変えることができる。

相関器

相関器は検出器と並んで、赤外干渉計の総合性能を決定する重要な要素の一つであり、2系統のIF信号の一方に必要な遅延を加える遅延線路群とIF信号間の乗算を行う乗算器で構成される。

特に乗算器に要求される性能は、IF信号の性質によって決定される。IF信号は、CO₂レーザー等を試験光源とする場合を除き一般にはDC-500MHzの帯域に広がっていて、さらにS/N比が小さいので相関器出力の積分時間を長く取る必要がある。また基礎実験においてはこ

の出力を常時モニターすることが不可欠であるので、乗算器はリアルタイムの処理が可能な広帯域(500MHz)アナログ式、または高速(1GHz以上)デジタル式が求められる。

そのために新しい試みとして、トランジスタ相互コンダクタンス(g_m)がコレクタ電流に比例することを利用する可変 g_m 方式¹¹⁾乗算用IC AD834¹²⁾を用いて、IF信号の帯域にほぼ対応する広帯域アナログ乗算器を開発した。現システムの相関器には、この新しい乗算器を組み込んでいる。AD834単体では、周波数帯域はDC-500MHzと発表されているが、実際上は100MHz以上の領域では精度が悪化する傾向があるので、入出力バッファ等周辺回路の開発を行った。

3.1.3 データ処理系サブシステム

データ処理系サブシステムのハードウェアは、ポインティング・ミラー対称移動ステージ及びFDAの制御用のGP-IBボード、相関器出力

用のA/D変換ボード等を備えたパーソナル・コンピュータを中心として、構成されている。

データ処理系サブシステムの役割は、相関器出力の系統的処理による相互相関関数記録までのシステム制御/データ処理の他に、相互相関関数群からの像再生処理の段階において極めて重要である。特にこの像再生においては、想定される種々の要因による誤差の解析、補正等の理論的な検討と直結したソフトウェアの開発が必要であり、これはシステムの最終的な性能、すなわち再生像の品質を決定する最重要課題の一つである。

4. 室内基礎実験

開発された赤外干渉計の各部・要素、及びシステム全体としての機能と性能を検証するための室内実験を、これまでにやってきた。これはまた、実用段階へのステップとして次に計画されている、遠方光源の像再生実験の実施に必要な、技術的基盤となるものである。

この室内実験においては、FDAの精密遅延調整機能を有効に利用した。すなわち、FDAは本来、相関器に内蔵される電氣的遅延装置の遅延量ステップの間を補間する光学的遅延装置として用いられるものであるが、ここでは試験光源から検出器の一方に到る信号光経路の途中

にFDAを挿入し、これで光路長を伸縮させることによって、2系統の検出器に到達する信号光の、相互の位相差の高精度な制御を実現している。

以下に、室内実験の第一段階として行った赤外ヘテロダイン検波実験、及び試験光源によるフリンジ・テストについて述べる。これらの室内実験によって、この干渉計システムの中でも特に重要な役割を担っている、CO₂レーザーとHgCdTe検出器による赤外光ヘテロダイン検波、及び広帯域アナログ相関器等の基礎技術の成否を確認することができた。

4.1 赤外ヘテロダイン検波実験

これらの室内実験においては、LOレーザーの波長は00⁰1-10⁰0帯のP(20)の発振線(波長 $\lambda = 10.591 \mu\text{m}$)を選択し、またFig.2の試験光源としてLOレーザーと同じP(20)線で発振させたCO₂レーザーを用いて、出力信号光を図の点線の光路により2個のHgCdTe検出器に導いた。検出器の一方(D2)への光路に挿入されたFDAによって光路長を伸縮させると、2個の検出器に到達する信号光の相互の位相差を自在に制御することができる。これによって、信号光がその位相関係を保持してヘテロダイン検波されていることを検証した。

Fig.4 Heterodyne-detected IF signals displayed on the CRT's of a spectrum analyzer (SA:left) and an oscilloscope (OS:right) when a CO₂ laser was used as a test radiation source. The SA display has scales of 10MHz/div. (horizontal) and 10dB/div. (vertical), showing the frequency difference of about 30MHz between the LO and the test laser. The OS display shows that the phase difference between the two IF signals was adjusted to π by the FDA, verifying its fine performance.

Fig.5 A fringe pattern obtained as correlator output variation in a fringe test. The correlator output (ordinate) is a function of the phase difference between two IF signals controlled by FDA.

Fig.4には、この実験においてスペクトラム・アナライザ及びオシロスコープのCRT画面に表示されたIF信号の一例を示す。これらの画面は、試験光源であるCO₂レーザの信号光がLOレーザとHgCdTe検出器によってヘテロダイン検波され、出力IF信号のレベルが(5)式による理論値とはほぼ一致していることを示している。

スペクトラム・アナライザ画面の横軸スパンは100MHzで、周波数0がLOレーザの信号に対応し、約30MHzの周波数のピークが試験用レーザ光の信号を表している。またオシロスコープ画面では、2系統のIF信号が同時に、上下に表示されている。これは、両者の位相差が180°で、相関器出力が極小値を示す場合の例である。

4.2 試験光源によるフリンジ・テスト

前節の実験と同じ配置で、FDAによって光路長を連続的に(実際には微小ステップで)伸縮させると、2系統の検出器に到達する信号光の相互の位相差を連続的に変化させることができ、検出器出力IF信号の相関器出力は正弦関数状のフリンジとなる。こうして得られたフリンジの一例を、Fig.5に示した。この実験では、試験光源レーザから検出器D1、及びD2へ

の光路長の差(FDAによるD2への光路伸長分を除く。Fig.2参照)は40cmであり、これがFig.1における $L \sin \theta_0$ (L :基線長)に相当する。図の横軸は、この検出器D2への信号光光路のFDAによる伸長を、FDAのステップ($0.4 \mu\text{m}$)を単位として表している。また、縦軸は相関器出力電圧であり、 $10 \mu\text{s}$ のサンプリング間隔でA/D変換された100個のデータが積分されており、コヒーレント積分時間は1msとなる。

これらのフリンジの再現性は極めて良好であり、この結果は、FDA、相関器等がTable Iに示された基本性能を備え、CRL赤外干渉計のシステムが全体として、所期の機能と性能を有していることを立証するものである。この点に関する考察を、次節において行う。

4.3 フリンジ・テストの意義

相関器出力 V_c は、(5)式に示したIF信号の積の低周波成分であるから

$$V_c = S (\eta e / h \nu_0)^2 P_L P_S \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (12)$$

と書くことができる。ここで、 S は相関器システムパラメータ、 η は各検出器の量子効率の相乗平均値であり、 P_L 及び P_S についても同様に、各検出器への入射パワーの相乗平均値とする。また ϕ_1 、 ϕ_2 は、各検出器への入射LO光に対する信号光の位相差である。すなわち

$$\phi_j = \phi_{Sj} - \phi_{Lj} \quad (j=1, 2) \quad (13)$$

ここで、 ϕ_{Sj} 、 ϕ_{Lj} はそれぞれ、検出器 j への入射信号光及びLO光の位相である。

したがって、一般にフリンジ・テストにおいては、各検出器への入射LO光の位相差の変動があれば、(12)式の $\cos(\phi_1 - \phi_2)$ の項により結果に影響を及ぼす。種々の位相差変動の中で、A/D変換のサンプリング周期に対して比較的長期の変動は、フリンジ・パターンの横軸方向への伸縮、すなわちフリンジ周期の変動を引き起こす。他方、サンプリング周期程度より短期の変動は、その変動の絶対値が比較的小さい場合

には、パターン上の各測定点における相関器出力の不規則な雑音成分；すなわち縦軸方向へのばらつきとなるが、これは積分時間の増大とともに減少し、フリンジはFig.5のような正弦関数状のパターンに収束して、上記の長期変動と同様に、フリンジの振幅は変わらない。

これに対して、位相差の短期変動の絶対値が($\pi/2$)程度を越えると、三角関数の性質から、積分による改善効果は減少する。(変動の性質により、積分の効果が異なる。例えば、変動の分布領域の幅が 2π を超え、完全にランダムな場合には積分値は0に収束し、フリジン検出されない。また、変動が正規分布に従うと仮定理論的には積分値は一定の値に収束して、フリジンが検出されるはずであるが、実際には分布パラメータの変化等によって、再現性は悪化する。)

本実験においてフリンジが検出され、さらにその再現性が良好であることは、各検出器への入射LO光間の位相差の短期変動が小さく抑えられていること、また長期変動についても、分オーダーの時間スケールでは検出されない程度であることを示している。これは、4.1節に述べたヘテロダイン検波実験においても、IF信号の波形の観察により確認されていることである。

4.4 システムの位相安定性

このように、干渉計においては、各検出器への入射LO光間の位相差を一定に近づけるために、システム全体にわたって、高度な位相安定性が要求される。そのためには、LOレーザー自体の発振周波数・位相の安定性、及び基線等システム各部の機械的安定性の確保が、極めて重要である。ここで安定性が問題となるのは、各検出器への入射LO光間の位相差であって、入射位相 ϕ_{L1} 、 ϕ_{L2} の対称的な(同符号で絶対値の等しい)変動は(12)-(13)式が示すように、相関器出力を変動させないことに注意する必要がある。本システムの位相安定性が確保されていることは、フリンジ・テストによって証明さ

れていることを前節に述べたが、次にシステムの特徴からその根拠を明らかにする。

単一のLOレーザーを使用する本システムでは、LOレーザー自体の周波数・位相の変動の影響は2個の検出器に対して等しく、積分時間に関わらずIF信号の位相差($\phi_1 - \phi_2$)においては相殺され、結果に影響を及ぼさない。また、(12)式中の P_L は、分オーダーの時間スケールでは0.5%以下の出力安定性が確保されており、数分でデータの取得を行う本実験においては、結果への影響はやはり無視できる。

次に、本システムの機械的安定性に影響する要因としては、システムを設置した光学ベンチが室温の変化によって伸縮し、LOレーザーから2個の検出器に到る光路長の差を変動させることが考えられる。これによる位相差変動は、急速なものではなく、フリンジ周期を変動させる長期変動である。光学ベンチはアルミ・ハニカム構造であり、その線膨張率は室温において $20 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 程度であるが、LO光の光路長差は約15cm、分オーダーの室温変動は0.1K以下の検出できない程度であるから、光路長差変動は $0.3 \mu\text{m}$ 以下($\ll \lambda$)となる。したがって、位相差の変動は極めて小さく、その結果フリンジの良好な再現性が得られることが理解される。

以上のように、本システムにおいてはLO光の位相安定性が確保されている。他方、信号光については、その光路がFDAを経由していることが、LO光との相異点である。したがって、FDAの機械的安定性、すなわち繰り返し精度がフリンジに反映することになり、波長と比較して十分に高い精度で動作することが、Fig.5から分かる。FDAは機械的可動部分を有する以上、有る程度の誤差は不可避であり、相関器出力の雑音成分となって記録され、その対策はデータ処理上の課題となる。

本システムより基線が長く、光路長の機械的変動及び大気の揺らぎによる各検出器への入射LO光間の位相差変動が無視できない場合には、単一のLOレーザーを使用するシステムでも、位相差変動の補償機構が必要となる。さらに、

基線長が数m以上の干渉計では、各検出器への入射LO光パワーのレベルを確保するために、それぞれ別個のLOレーザーを用い、位相変動の補償を行った上で各レーザーの位相をロックする技術が必要である。このような技術はすでに実現された例があり⁷⁾、我々も開発の準備をすすめている。

5. おわりに

赤外(10 μ m帯)領域における遠方対象物の高分解能の観測・像再生を目的として、CO₂レーザー・ヘテロダイン検波を用いる2素子赤外干渉計を開発し、これまでの室内実験によりその基本機能・性能を検証することができた。

干渉計の本来の機能である高分解能の観測能力を実証するためには、屋外の遠方に設置された試験光源・物体を観測する像再生実験が必要であり、現在準備を進めている。

またこの実験においては、基線と試験光源の配置に関連する構造的・幾何学的な誤差、及びシステム各部の物理的パラメタの変動によって生じる種々の観測誤差等を考慮に入れた像再生ソフトウェアの開発が必要となる。これに関連して、像再生実験の結果を予測するための計算機シミュレーションを行い、開発上の諸課題の整理検討を始めている。

最後に、赤外干渉計が地上に設置された場合に受ける、大気の揺らぎの観測への影響は重要な研究課題である。上記の実験においても、これに関する基礎的なデータが得られると期待される。

謝 辞

本研究は科学技術振興調整費による国際流動

基礎研究課題「極限分解光イメージング技術に関する研究」の一環として開始されたもので、御助力をいただいた科学技術庁及び諸研究機関の関係者の皆様に、深く感謝致します。また、LO-CO₂レーザー関連の貴重なアドバイスと基礎実験への御支援をいただいた理化学研究所塚越幹郎副主任研究員(現東京理科大学教授)及び箕曲在道研究員に、厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 清水 実：宇宙の観測 I (恒星社, 1981) 第 2 章。
- 2) 久保亮五他編：岩波理化学辞典第 4 版(岩波書店, 東京, 1987)p.1143.
- 3) G.W. Swenson and N.C. Mathur: Proc. IEEE **56** (1968) 2114.
- 4) C.v. Schooneveld (ed): Image Formation from Coherence Functions in Astronomy (Proc. IAU Colloq. No.49, Groningen, 1978; D. Reidel Pub. C., Dordrecht).
- 5) 石黒正人：宇宙の観測 I (恒星社, 1981) 第 11 章。
- 6) K. Yoshimura et al.: Results of the VLBI experiments at CRL (Special Issue), J. CRL **38** (1991) 393.
- 7) M. Bester, W.C. Danchi, P. McCullough and C.H. Townes: in 'Lec. Notes in Phys. (Springer, Heidelberg, 1989)
- 8) K.J. Johnson: 1991 Tech. Digest S. 19, Conf. Space Optics for Astrophysics, Williamsburg, 1991 (OSA, 1991) p.100.
- 9) 末田 正：光エレクトロニクス(昭晃堂, 1985) p.205.
- 10) T.Kostiuk and M.Mumma: Appl. Opt. **22** (1983) 2644.
- 11) 松井邦彦：トランジスタ技術 **27** (1990) No.4, 525.
- 12) AD834 データ・シート(アナログ・デバイセス, 1988)