

[SYNOPSIS] An optical simulator useful for a variety of laboratory experiments on intersatellite laser links using beams of a few microradian divergence angle is described. To simulate beam transmitting/receiving conditions at optical transceiver packages in space, the main optics of the simulator is composed of Fourier transform lenses and pin-holes movable in the focal plane. The high-precision optics applicable to the simulator can be practically constructed by using, for example, a refractive lens of 25 cm diameter and of 20 m focal length, and a 10 μm diameter pin-hole mounted on a translation stage of 1 μm resolution.

1.はじめに 現在、内外で研究開発が進められている半導体レーザ(波長0.8 μm 帯)を用いる光衛星間通信(光ISL、Fig. 1参照)⁽¹⁻³⁾では、口径20cm級の光アンテナを用いビーム幅が0.001度以下という光ビームを形成、通信に利用する。このビーム幅は衛星の姿勢変動、軌道運動に伴う追尾や指向の必要角度範囲に比べて非常に狭いので(Table 1参照)、通信回線を形成・維持する為に高度の捕捉・追尾・指向の技術が必要になる⁽⁴⁾。例えば、両衛星の通信装置が互いに協力して光ビーム幅の拡大・縮小、ビーム走査等を行う相互捕捉、狭ビームを用いた相互追尾・指向などが必須の技術であり、ビーム制御系の高性能化とアルゴリズムの開発、センサ雑音を始めとする種々の雑音の影響の解明・克服が課題となっている。

このような技術の効率的な研究開発とシステム実証のためには、遠方界の広がりが数 μrad から数10 μrad の狭ビームの確実な形成・計測とともに、1 μrad 以下の分解能のビーム方向の正確な制御が重要な基本技術である。システム実証に関しては従来からの代表的な考えとして地上-航空機間で作れる長距離回線の利用があるが、大気の影響があること、光領域で遠方界を達

成するための十分な距離が確保できないことなどによって、光ISLの数 μrad の広がり角の狭ビームを用いた実験は困難である(～100 μrad ビームの実験例はある)。本稿では、実験室において光学的に自由空間を模擬することができ、狭ビームの形成・計測に関する実験、捕捉・追尾・指向に関する動的な実験、さらに光ISL双方向シミュレーションの可能な光ISLシミュレータを提案し、その基本模擬機能と構成要素について述べる。

Table 1. Optical beamwidth and beam control parameters in a typical intersatellite laser link

optical beamwidth	～4 μrad (FWHM)*
required pointing stability	<0.3 μrad (rms)
tracking angular range	±8 mrad(max)**
uncertainty cone angle	3.5～8 mrad(max) **
point-ahead angle	0～70 μrad

*assuming a 20 cm antenna diameter and 0.8 μm wavelength, **residual of open-loop satellite position tracking

2. 光ISLシミュレータの基本模擬機能 本装置は、光ISLにおいて予想される光ビームの送受信条件を実験室で安定に模擬し、計測できるシステムを目指して

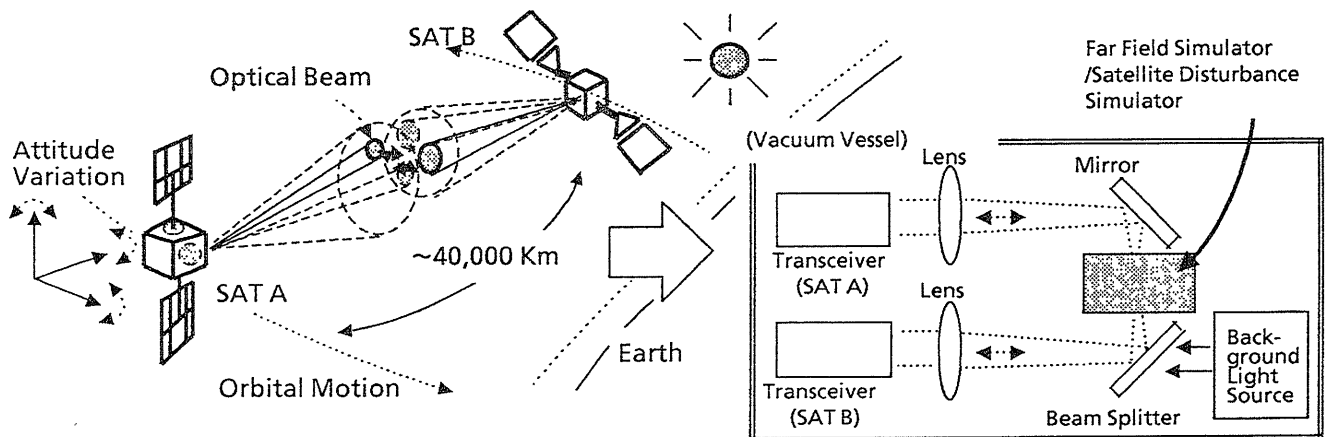


Fig. 1 Concept of an optical intersatellite link (left part) and a basic configuration of its ground simulation system (right part; an optical intersatellite link simulator)

Table 2. Simulating functions of an optical intersatellite link simulator

features of optical intersatellite link		simulating functions
intersatellite laser propagation	very long distance	far field beam pattern, received plane wave, attenuation, propagation time delay
	free-space propagation	no waveform distortion
	the existence of background	incoherent light irradiation
satellite dynamics	attitude variation and gimbals mechanics noise	variation in arrival angle and beam pointing angle
	uncertainty in attitude and position	plane wave incidence from arbitrary directions
	orbital motion	optical frequency shift point-ahead compensation

いる。基本的に光通信装置或るいは光ビーム制御装置は固定して設置されるものとする。そのため、Table 2に示すような衛星振動と運動、衛星間の長距離伝搬を模擬するための任意方向から到来する平面波の生成と制御、光アンテナの遠方界生成・計測が主要技術となる。その他、背景光、伝搬遅延、光周波数変化などの模擬がある。装置の光学的な基本構成の例をFig. 1内の右側に示している。

光ビーム送信の場合、無収差のレンズまたは反射鏡を用いて焦点面にフラウンホーフパターンを生じさせる。これにより、光アンテナ出射ビームの遠方界パターンが実測できる。また、パターンのサイズより十分に小さいピンホールを用いて遠方界を部分的にピックアップし、それからの透過光をレンズでコリメートして平面波を形成する。光送受信装置を固定したとき、衛星振動等が原因の指向方向変化による到来光強度の変化は、このようなピンホールを焦点面内で移動させることによって模擬できる。双方向回線におけるポイントアヘッド補正に関しては、レンズ焦点面内に送信用、受信用の別々のピンホールを設けることによって模擬できる。

大気と真空の屈折率差の影響は、光学的には通信装置内部のフォーカシング微調整で問題になる。ビーム制御に関する光学実験では屈折率差の影響は小さく、光伝搬空間の屈折率が安定していることが最も重要である。そのために真空槽を用いる場合は数 Torr ほどの低真空で十分であり、宇宙空間を模擬するような高真空環境を作ることは特に必要ではない。

3. 光学系構成 実際の装置構成に際しては、従来からの光計測技術を応用した種々の方法が考えられるが、計測目的とそれに応じたシステム規模、経済性、安定性等を考慮する必要がある。また、地上における微小外来震動雑音の影響及び大気シンチレーションの問題がある。ここでは、光アンテナ口径20cm、波長0.8 μmの光ISLシステムを想定する。ビーム径が20 cm以

上で、波面誤差が $\lambda/30 \sim \lambda/20$ (rms)の準平面波の生成とTable 1に示されるような範囲における光ビーム方向制御が必要になる。方向制御の分解能は、例えばビーム幅の数10分の1として1/20 μrad程度となる。

平面波の生成と遠方界の形成のための大口徑無収差レンズとして、視野が大きく取れる、経済的である等の理由で長焦点距離の屈折型レンズが適当である。その焦点距離はピンホールの製作精度、焦点面内遠方界パターンの実寸法、焦点面内位置微動装置(パルスステージ)の分解能に依存する。前述のシステムパラメータの場合、実現性のある装置パラメータの概算例として、レンズ焦点距離20m(F#/100)、ピンホール径10 μm、パルスステージ分解能1 μmとなる。なお、適当な除震措置を行なった後の微小外来震動雑音の大きさを1 μm(p-p)と想定している。

上記のような長距離の光学系構成としては、耐振動環境性、長光路性等を考慮すると、2つの送受信装置を一緒に光学ベンチ上に載せ、また折返し用の平面鏡対を別の光学ベンチ上に載せる折返し光路の構成が有効である。伝搬路上の大気環境を一定に保つためには、無風でしかも温度が一定のトンネル或るいは低真空の容器で伝搬路を覆うことが考えられる。

4. おわりに 現在、振動測定と空間光ビーム伝送の予備実験の結果、折返し約40 mの光路で1μrad(peak to peak)以下の方向揺らぎで計測システムの構築が可能である見通しが得られている。今後、光ISLに関する種々の基礎実験を進めるとともに、機器発熱、空調等に影響されない安定な計測のための1 Torr ほどの低真空の長距離真空槽の導入を検討していく予定である。最後に、日頃御討論戴く古濱社長を始めとする当研究所の諸氏に感謝する。

(参考文献) (1) 鹿谷他, 信学技報, SAT88-9. (2) M. Fitzmaurice, SPIE Proc. 887. (3) L. Frecon et al., SPIE Proc. 616. (4) 荒木他, 信学技報, SANE87-23.