

大気ゆらぎを考慮した衛星 地上局間通信のための 光波伝搬シミュレーションの構築

The Light Wave Propagation Simulation in Consideration of the Influence of the Atmosphere Fluctuation for Communication between Satellite and Earth Station.

戸田絵美^{*1} 高山佳久^{*2} 駒井友紀^{*1} 小舘香椎子^{*1}
Emi Toda Yoshihisa Takayama Yuki Komai Kashiko Kodate

^{*1} 日本女子大学理学研究科 ^{*2} 情報通信研究機構

Faculty of Science, Japan Women's University, National Institute of Information and Communications Technology

1. はじめに

情報の大容量化に伴い、地球観測衛星、有人宇宙ステーション等において大容量の情報伝送が必要とされている。従来、衛星通信には電波を用いてきたが、通信機器の小型化、回線間の干渉の回避が可能、高速・大容量通信が可能などの理由から、光を用いた衛星通信が注目されてきている。2006年に宇宙航空研究開発機構(JAXA)と情報通信研究機構(NICT)は、地上高度約600kmを周回しているJAXAの光衛星間通信実験衛星「きらり(OICETS)」とNICTの光地上局との間で、低軌道衛星-地上局間光通信実験に世界で初めて成功している。低軌道周回衛星と地上局間の光空間通信は、受信光レベルが大気ゆらぎにより大きく変動するため、大気の影響を考慮した光波解析が重要になる。そこで、我々は大気中のゆらぎを考慮するために、フェイズスクリーン(Phase Screen)を用いた光波伝搬シミュレーションプログラムを構築し、大気揺らぎの要因やその変化が光波に与える影響について数値解析を行ったので報告する^{1),2)}。

2. 光波伝搬シミュレーション

衛星光通信で用いられるレーザー光は、高度0km~20kmにおいて大気ゆらぎの影響を大きく受ける。大気ゆらぎの要因として雨や霧、雲などの影響が考えられるが、これらの影響は定式化して考えることが困難なため、我々はフェイズスクリーンと有限差分ビーム伝搬法を用いることにより、擬似的に大気ゆらぎを考慮し、数値計算を行った。ビーム伝搬法は、図1のように伝搬方向に沿って区切られた解析空間を逐次的に計算していく方法である。また、フェイズスクリーンは、図2に示すように、格子状に分割したx-y面の各格子点にランダムな屈折率を持った非常に薄いスクリーンのことである³⁾。

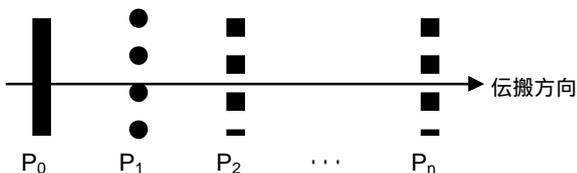


図1 ビーム伝搬法概念図

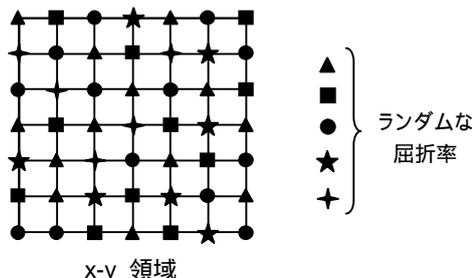


図2 フェイズスクリーン概念図

例えば、図1の P_0 面から P_n 面まで伝搬する光波の解析を行うとする。図1に示すように、伝搬距離を微小区間に分割し、 P_0 面から P_n 面の各面にフェイズスクリーンを適用する。入射光は、 P_0 のフェイズスクリーンを通ることによって大気ゆらぎの影響を受け、微小区間だけ離れた P_1 面まで伝搬する。この光波伝搬結果を P_1 面への入射光とし、同様に P_1 面から P_2 面まで伝搬した結果を P_2 面の入射光にと、伝搬方向に沿って逐次的に P_n まで計算することにより、光波が大気ゆらぎによって受ける影響を考慮することが可能となる。

また、大気ゆらぎの状態を表す変数 Cn^2 は(1)式のようなモデルを用いた。 Cn^2 の高度依存性を図3に、 Cn^2 算出パラメータを表1に示す⁴⁾。 v は風速(km/s)、 h は高度(m)、 A は地面の高さに依存する係数である。

$$Cn^2(h) = 0.00594(v/27)^2(10^{-5}h)^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + A \exp(-h/100) \quad (1)$$

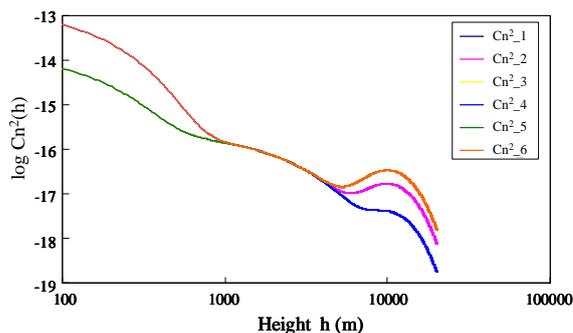


図3 $Cn^2(h)$ のプロファイル

表1 Cn²(h)算出パラメータ

data	v (m/s)	A (m ^{-2/3})	h
Cn ² _1	21	1.70E-14	0-20km
Cn ² _2	21	1.70E-13	
Cn ² _3	10	1.70E-14	
Cn ² _4	10	1.70E-13	
Cn ² _5	30	1.70E-14	
Cn ² _6	30	1.70E-13	

構築した計算プログラムの妥当性を確認するために、波長 1500nm、伝搬距離 10km、風速 21km/s、ビームウエスト 10cm のときの光波伝搬後の数値計算結果と理論値の比較を行った。理論値は、(2)式のように表される。

$$\langle I(r,L) \rangle = \frac{W_0^2}{W_e^2} \cdot \exp(-2r^2/W_e^2) \quad (2)$$

ここで、 $\langle I(r,L) \rangle$ は光強度の時間平均、 W_0 はビームウエスト、 W_e は伝搬後のスポットサイズである。

また、シミュレーションにより算出した計算値と(2)式から算出した理論値の比較を図4に示す。

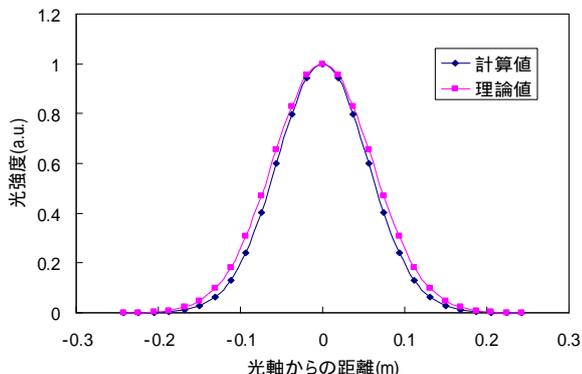


図4 理論値と計算値の比較

計算値と理論値の伝搬後のスポットサイズ W_e をそれぞれ算出した結果、計算値では $W_e = 20.61(\text{cm})$ 、理論値では $W_e = 20.54(\text{cm})$ となり、誤差 0.32% と小さいことから、構築した計算プログラムの妥当性を確認した。

3. 光波伝搬シミュレーションによる評価

構築した光波伝搬シミュレーションの結果は、光通信衛星の送受信装置の設計の最適化などに有効であると考えられる。そこで、大気ゆらぎの影響を受けた光波の状態をビーム伝搬法とフェイズスクリーンを組み合わせさせたシミュレーションプログラムによって検討した。

まず、プログラムの評価として、フェイズスクリーンを

考慮しない場合（大気のゆらぎがほとんどない場合）と、フェイズスクリーンを考慮した場合（大気ゆらぎが光波に影響を与える場合）との比較を行い、光波が大気ゆらぎによって受ける影響について確認した。図5にフェイズスクリーンを仮定しない場合（P.S.なし）と仮定した場合（P.S.あり）の光波伝搬結果の比較を示す。伝搬条件は、波長 1500nm、伝搬距離 10km、風速 21km/s、ビームウエスト 10cm とした。

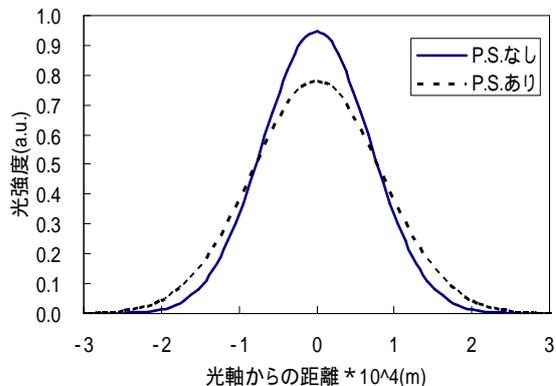


図5 P.S.なし、P.S.ありの光波伝搬結果の比較

図5に示すように、フェイズスクリーンを考慮した場合の方が考慮しない場合に比べ、大気ゆらぎの影響を考慮している分、光強度が減衰していることが分かる。この減衰の度合いは、伝搬距離、ビームウエスト、風速、高度などに依存すると考えられる。これらの詳細な検討については、発表当日示す。

4. おわりに

ビーム伝搬法とフェイズスクリーンの組み合わせにより、大気ゆらぎを考慮した衛星 地上局間光通信用計算プログラムの構築を行い、計算プログラムの妥当性を確認した。今後、風速、高度など、大気のゆらぎを決定するパラメータを変化させたときに光波が受ける影響について検討を行なう。また、伝搬途中の遮蔽物や光学機器の影響についても検討を行い、様々な条件下での光波解析が行える数値計算プログラムの構築を目指す。

参考文献

- 1) 戸田絵美, 高山佳久, 駒井友紀, 小館香椎子, 第69回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, Vol. 3, p. 861 (2008).
- 2) E. Toda, Y. Takayama, Y. Komai, K. Kodate, MOC 08, Session A, P-13, pp.137-138 (2008).
- 3) Wm. A. Coles, J. P. Filice, R. G. Frehlich, and et al., Applied Optics, Vol. 34, No. 12, pp. 2089-2101 (1995).
- 4) L. C. Andrews, R. L. Phillips, and P. T. Yu, Applied Optics, Vol. 34, No. 33, pp.7742-7751 (1995).