

低軌道衛星－地上局間光通信回線における 高品質化に関する研究

竹中 秀樹

電気通信大学

2014年9月

低軌道衛星－地上局間光通信回線における 高品質化に関する研究

竹中 秀樹

電気通信大学大学院 情報システム学研究科
博士（工学）の学位申請論文

2014年9月

低軌道衛星－地上局間光通信回線における 高品質化に関する研究

博士論文審査委員会

主査 工藤 俊亮 准教授
委員 高山 佳久 客員准教授
委員 阪口 豊 教授
委員 末廣 尚士 教授
委員 森田 啓義 教授
委員 野嶋 琢也 准教授
委員 豊嶋 守生

著作権所有者

竹中 秀樹

2014

Study on the quality improvement of low-earth-orbit satellite to ground optical communication links

Hideki Takenaka

Abstract

In recent years, the size of high-resolution images and the data from observation equipment have increased owing to the advances in satellite functionality. The communication method widely used in space communication is radio frequency (RF) communication, whose maximum speed is 3.2 Gbps, as measured by the Wideband InterNetworking engineering test and Demonstration Satellite. In the future, the required communication capacity per carrier will be in dozens of gigabits per second; however, the realization of this requirement in RF communication is difficult. In addition, the divergence angle in RF communication is larger than in free-space optical communication, resulting in radio wave interference. Satellite optical communication has been attracting attention as an alternative method of solving the problem of large-capacity communication. It offers several advantages such as power saving, miniaturization of the apparatus, and faster communication speed in satellite optical communications. In addition, the interference problems in satellite optical communication can be reduced because the divergence angle can be narrowed compared with that in the RF communication.

In this paper, to improve the stability of communication quality in space optical communication, we propose a method to reduce the effects of atmospheric turbulence. We propose the following two techniques to improve the communication quality of satellite-to-ground optical communications. First, we apply a fiber-coupling technique using a high-speed control fine-tracking mechanism to the physical layer. Next, we apply an error correction code after converting the analog signal into a digital signal to a layer higher

than the physical layer. The conventional theory regarding fiber-coupling efficiency to a single-mode fiber in free-space optical communication is considered by assuming horizontal propagation in atmospheric turbulence. In this study, we propose a new theoretical formula for fiber-coupling efficiency to a single-mode fiber for satellite-to-ground optical communication that corresponds to the altitude change of the satellite. In addition, we verified the process by experiment and numerical simulations. The results of the numerical simulations revealed that the fiber-coupling efficiency in the conventional theoretical equation of horizontal propagation converged to zero as the communication distance became longer.

On the other hand, we show that the results can be realistically calculated because the proposed equation considers the altitude change of the atmospheric turbulence. The experiments were performed using Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite (OICETS), leading to a single-mode fiber when a fine-tracking mechanism was used to receive optical signals through the atmosphere from the satellite to the ground station. This experiment demonstrated that by installing a fine-tracking mechanism in the ground station, the optical signal could be conducted by a single-mode fiber to reduce the effect of atmospheric turbulence. From the experimental results, the fiber-coupling loss of the single-mode fiber in the fine-tracking mechanism operation was maintained at approximately -11 to -18 dB. We compared the simulation and experimental results and verified the validity of the proposed theoretical formula because the numerical simulation result loss was -17 dB.

Next, for the second communication method to improve the quality of satellite-to-ground optical communication, we studied the implementation of an error-correction code. The error-correction code can correct error signals caused by atmospheric turbulence. The number of satellite-to-ground optical communication experiments carried out was small,

and therefore, a general propagation model was not developed. In this study, using a propagation model generated from the data obtained from the OICETS experiment, we verified the communication quality through simulation. In particular, we examined whether an effect could be realized that improves the communication quality using low-density generator matrix (LDGM) codes. We showed the effectiveness in correcting burst errors due to atmospheric turbulence and the depth of the 250 blocks interleaving in this atmospheric turbulence propagation model. To confirm the improvement in the optical communication quality by the LDGM code, we determined its coding gain using an on-off-keying scheme through simulation.

As a summary, we have designed a satellite-to-ground optical communication link. We performed a comparison of the technology without applying the process and under the following cases: 1) coupling to a single-mode fiber the received optical signal and applying an optical amplifier, 2) applying an error-correction code, and 3) applying all methods. The results showed how we have contributed to the improvement in the quality and communication speed on the basis of the line calculation.

低軌道衛星－地上局間光通信回線における 高品質化に関する研究

竹中 秀樹

概要

近年、衛星のセンサやカメラの解像度の向上により、衛星通信における通信データ容量が増加傾向にある。宇宙通信で現在広く使用されている通信方法はRadio Frequency (RF) 通信であり、現在のRF通信の最大通信速度は日本の超高速インターネット衛星(WINDS)の3.2Gbpsである。今後、必要になると見込まれる1キャリア当たりの通信容量は数十Gbpsであるが、現在のRF通信ではその実現は困難といえる。また、RF通信はレーザー空間光通信に比べて広がり角が大きく電波の干渉を生じるという問題もある。そこで大容量通信という課題を解決するための方法として、レーザーを用いた宇宙光通信が注目されている。宇宙光通信は、通信速度の高速化、装置の小型化、省電力などの面で利点があり、またレーザーの広がり角をRF通信と比べて狭めることが可能であるため干渉問題を抑えることもできる。

本論文では、宇宙光通信における通信品質の安定化と向上を目的として、大気揺らぎの影響を低減させる手法を提案する。具体的には以下の二つの手法を提案し、衛星－地上局間光通信の通信品質の向上を試みる。まず、物理層に対して高速制御可能な精追尾機構を用いたファイバカップリング技術を適用する。次に、物理層よりも上位の層に対してデジタル信号に変換した後に誤り訂正符号を適用する。空間光通信のシングルモードファイバへのファイバカップリング効率に関する従来の理論では、大気揺らぎは水平伝搬という条件の下で考慮されていた。

それに対し本研究では、高度変化に対応した衛星－地上局間光通信のシングルモードファイバへのファイバカップリング効率の理論式を新たに提案し、数値シミュレーションと実証実験で検証した。数値シミュレーションの結果、水平伝搬を前提とした従来の理論式で

は通信距離が長くなるにつれファイバカップリング効率がゼロに収束してしまうのに対し、今回提案した高度変化に対応した理論式では、高度変化による大気揺らぎが考慮されているため、より現実に即した値が計算できることが示された。また、実際に低軌道上にある光衛星間通信実験衛星 (OICETS) を用いて、衛星-地上間の伝搬路において大気揺らぎを受けた光受信信号を、精追尾機構を介してシングルモードファイバに導く実験を実施した。この実験により、地上局に設置した精追尾機構を用いて、大気揺らぎによる影響を低減しつつシングルモードファイバに光を導けることを実証した。実験結果より、精追尾機構動作時におけるシングルモードファイバへのファイバカップリング損失はおよそ-11~-18dB で推移していることが確認された。この結果をシミュレーション結果と比較すると、新たに提案した理論式を用いた数値シミュレーション結果が-17dB の損失であったことから、提案した理論式の妥当性が示された。

次に衛星-地上間光通信の通信品質改善に向けた第2の方法として、符号化の実装に関する検討を実施した。符号化に際して、誤り訂正符号を使用することで大気揺らぎが原因で発生する信号のエラーを訂正することが可能となる。衛星-地上間光通信についてはこれまで実施された実験の回数も少なく、広く使われている伝搬モデルは存在しない。本研究では、OICETS 実験で実際に得られたデータから生成した伝搬モデルを用い、通信品質をシミュレーションにより検証した。

具体的には、符号方式として Low-density generator matrix (LDGM) 符号を用いて通信品質の改善に効果があるかを検討した。今回用いた大気揺らぎ伝搬モデルにおいては、ブロックインターリーブの深さを 250 にすれば大気揺らぎに起因するバースト誤りの訂正に効果を発揮することが確認できた。また、LDGM 符号により通信品質がどの程度改善するかを確認するため、光通信における on-off-keying 方式の LDGM 符号の符号化利得をシミュレーションで求めた。

さらにこれまでのまとめとして、衛星-地上間光通信の回線設計を行った。受信光をシングルモードファイバへカップリングし、光アンプを適用した場合、符号化を適用した

場合，両方適用した場合の三つの場合について，何も適用しない場合と比較することで，これらが通信の高速化や品質の向上にどのように貢献しているかについて回線計算を基に示した．

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究目的	6
1.3 論文構成	9
第2章 衛星-地上間光通信における技術項目	11
2.1 大気揺らぎの概要	11
2.2 大気揺らぎのモデル	12
2.2.1 大気揺らぎ理論	12
2.2.2 SLC モデル	13
2.2.3 Hufnagel-Valley モデル	15
2.3 空間光通信に関する理論	16
2.3.1 シンチレーション	16
2.3.2 到来角度変動	17
2.3.3 スペックルパターン	18
2.4 まとめ	19
第3章 衛星-地上間光通信実験におけるファイバカップリング実験	20
3.1 シングルモードファイバへのカップリング理論式	20
3.1.1 大気揺らぎ存在下での水平伝搬ファイバカップリング理論	20
3.1.2 大気揺らぎ存在下での水平伝搬ファイバカップリング効率	21

3.1.3	衛星-地上間光通信に拡張したファイバカップリング理論	23
3.1.4	シミュレーション	24
3.1.5	水平伝搬と高度変化に対応した理論式の比較	27
3.2	実験システム概要	29
3.2.1	光衛星間通信実験衛星システム	30
3.2.2	光地上局システム	32
3.3	ファイバカップリング実験	34
3.3.1	精追尾機構の構成	34
3.3.2	精追尾機構の QD センサの校正と基礎データの取得	37
3.4	実験結果	41
3.4.1	実験期間と成功率	41
3.4.2	ファイバカップリングの測定結果	44
3.5	実験結果からの考察	45
3.5.1	実験結果と理論値との比較	45
3.5.2	周波数解析	46
3.6	まとめ	48
第 4 章	符号化の適用	50
4.1	衛星-地上間シミュレーション光通信における符号化の検証	50
4.1.1	符号化の概要	50
4.1.2	線形符号	53
4.1.3	LDGM 符号	53
4.2	ソフトウェアシミュレーションの実施	56
4.2.1	シミュレーション構成	56
4.2.2	SOTA	57

4.2.3	大気揺らぎを考慮した通信路	59
4.2.4	シミュレーション結果	63
4.3	インターリーブの検討	64
4.4	符号化利得の計算	68
4.4.1	符号誤り率	68
4.4.2	シミュレーション条件	71
4.4.3	シミュレーション結果	73
4.5	衛星-地上間光通信の回線設計	75
4.5.1	回線設計の条件	75
4.5.2	符号化の適用	78
4.5.3	精追尾機構と光アンプの適用	78
4.6	まとめ	80
第5章	結論	82
	謝辞	85
	業績	98

目 次

2.1	SLC モデルにおける高度と屈折率構造パラメータの関係	15
2.2	H-V モデルにおける高度と屈折率構造パラメータの関係	16
2.3	到来角度変動の概要図	17
2.4	OICETS 実験で取得したスペックルパターン	18
3.1	大気揺らぎ存在下での水平伝搬ファイバカップリングのシステム概要	21
3.2	伝搬距離と C_n^2 によるファイバカップリング効率	22
3.3	伝搬距離と波長の違いによるファイバカップリング効率 ($C_n^2 = 10^{-13}$)	23
3.4	式 (2.8) の A を変化させたときのファイバカップリング効率 ($L = 1000m$)	25
3.5	天頂角度と高度の変化に対するファイバカップリング効率	26
3.6	高度と波長の変化に対するファイバカップリング効率	26
3.7	水平伝搬におけるファイバカップリングの理論式 (ρ_c) と拡張した高度の変 化に対応したファイバカップリングの理論式 (ρ_z) との比較	28
3.8	地上-衛星間光通信実験の概要	29
3.9	きらり (OICETS) (Copyright of JAXA)	31
3.10	1.5m 望遠鏡の外観	33
3.11	精追尾機構の駆動部	34
3.12	精追尾機構のコントローラ制御部	35
3.13	精追尾機構の実験システム構成図	36
3.14	QD センサの構成図	37

3.15	x 軸の規格化 QD 出力 QD_x と piezo ドライバ入力電圧の関係	38
3.16	y 軸の規格化 QD 出力 QD_y と piezo ドライバ入力電圧の関係	39
3.17	試験光源での QD センサの追尾データ	40
3.18	ファイバカップリングレベルとサーボ動作	44
3.19	ファイバカップリング損失の時間変化	45
3.20	FFT の解析結果 (精追尾機構 ON 時)	47
3.21	FFT の解析結果 (精追尾機構 OFF 時)	48
4.1	LDGM 符号検査行列の例 ($jn = kn = 3$)	55
4.2	LDGM 符号の 2 部グラフの例	55
4.3	シミュレーション構成図	57
4.4	大気揺らぎモデルの周波数スペクトル	61
4.5	大気揺らぎモデルを用いて生成した強度変動	62
4.6	OICETS 実験で取得した受信強度の FFT 解析結果	62
4.7	ランダム消失通信路の LDGM 符号の packet エラーレート	63
4.8	大気揺らぎを考慮した通信路における LDGM 符号の packet エラーレート	64
4.9	インターリーブの方法	65
4.10	インターリーブ適用前のエラー傾向	66
4.11	インターリーブ適用後のエラー傾向 ($J_l = 200$)	67
4.12	インターリーブ適用後のエラー傾向 ($J_l = 500$)	67
4.13	インターリーブを適応した大気揺らぎ通信路における LDGM 符号の packet エラーレート	68
4.14	信号レベルの分布	69
4.15	packet フォーマット	72
4.16	LDGM 符号における符号化利得	75

表 目 次

3.1	OICETS の仕様 [31]	30
3.2	LUCE の仕様 [31]	32
3.3	1.5m 望遠鏡の仕様	33
3.4	精追尾機構の仕様 [66]	35
3.5	OICETS 実験の月別実験結果 [36]	42
3.6	OICETS 実験結果一覧 [36]	43
3.7	シミュレーションパラメータ	46
4.1	符号の種類と特徴 [71, 72, 75, 76, 89]	52
4.2	LDGM 符号パラメータ [92]	58
4.3	SOTA 送受信機能 [93]	58
4.4	LDGM 符号パラメータと最小距離 [92]	74
4.5	通信回線の条件と地上局における受信電力	77
4.6	各通信速度における必要受信電力	77
4.7	各適用手法における受信電力のまとめ	79

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年、資源探査や自然保護、災害対策のために衛星利用が行われている [1-3]. 衛星から送信される地球観測の詳細なデータを効率よく、安定的に取得する必要があると考える. この多量のデータを地上に効率よく送る手法として、伝送速度を向上させる方法やデータ圧縮を行う方法が検討されている [4]. 著者は、衛星側でのデータ圧縮するときの演算負荷や計算時間によるタイムラグなどの問題を少なくするためには、伝送速度を向上させる方法が有効であると考え、衛星-地上間通信における伝送速度の向上について着目している.

衛星通信における通信速度は、衛星のセンサや光学カメラの解像度の向上により増加傾向にある [5-8]. 例えば、日本国内において宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が 2006 年に打ち上げた陸域観測技術衛星 (ALOS) は、解像度 2.5m の光学センサと解像度 10m の合成開口レーダーを搭載しており、通信速度は 240Mbps である [9]. 2014 年に後継機として打ち上げ予定の陸域観測技術衛星 2 号 (ALOS-2) は、1~3m の分解能を持つ合成開口レーダーを搭載し、センサから出力される通信速度は 800Mbps と ALOS の約 3 倍に増加する [10, 11]. また、文部科学省で行われた防災のための地球観測衛星等の利用に関する検討会においても、今後 1m 以下の分解能を持った衛星が必要になると提言され、さらに JAXA でも高解像度衛星の開発が検討されている. センサの解像度はさらに増加し、それに伴い必要データ容量も大きく増加すると考える [12, 13].

現在、宇宙通信で広く使われている通信方法は、Radio Frequency (RF) 通信である. RF

通信の最大通信速度は、JAXA の衛星である超高速インターネット衛星 (WINS) の 3.2Gbps である [14,15]. 衛星の通信速度は、これまでの増加傾向から予測すると、将来、数十 Gbps の通信速度が必要になると見込まれる [7]. 現在の RF 通信では、1 キャリア当たりの通信容量を数十 Gbps にするのは困難であり、また RF 通信は干渉問題が発生する.

そのため、国内における RF 通信の使用は電波法により使うことができる周波数の割り当てが決められている. 一方で衛星における RF 通信は、周波数の割り当てを管理している国際電気通信連合 (ITU) へ少なくとも 2 年以上前から総務省を通じて申請を行い、各国と調整を行う必要がある [16,17].

今後の大容量高速通信という課題を解決するための方法として、現在、レーザを用いた宇宙光通信が注目されている. 光は、周波数が高いので指向性が高く、帯域を広くとることが可能である宇宙光通信は、通信速度の高速化、装置の小型化、省電力などの面で利点がある. また、光の高い指向性は、干渉を抑えることを可能にするため、国際的な周波数調整の対象に含まれていない利点もある.

宇宙光通信は、1970 年頃から衛星－地上間での伝送実験や検証が行われた [18,19]. 日本国内では、1984 年に技術試験衛星 (ETS - 3) において広がり角 1mrad 以下のレーザ伝送実験が行われ成功した [20]. これは、衛星に搭載されたカメラで地上からの光を確認する実験であった. また、1986 年に静止気象衛星 (GMS - 3) への Ar レーザと炭酸ガスレーザの同時伝送実験が成功した [21]. 海洋観測衛星 1 号 b (MOS - 1b) においても、レーザ伝送が地球画像の校正への応用実験として行われ、1989 年東京都小金井市にある通信総合研究所 (現：情報通信研究機構、NICT) に宇宙光通信地上センターが設置されると、衛星レーザ測距システムにより測地衛星 (LAGEOS) や、炭酸ガスレーザによる ADEOS の観測が行われた [22,23].

その後、1994 年に打ち上げられた ETS-6 において静止衛星－地上間光通信実験が行われ、世界ではじめて宇宙光通信実験が成功した [24]. 2001 年にフランス国立宇宙研究センター (CNES) の低軌道リモートセンシング衛星 (SPOT - 4) と欧州宇宙機関 (ESA) の

通信用静止衛星 (ARTEMIS) の間で, SPOT - 4 から ARTEMIS への片方向の通信実験が成功した [25]. 2005 年に JAXA の光衛星間通信実験衛星 (OICETS) において, 静止衛星 ARTEMIS との低軌道衛星 - 静止衛星間光通信が成功した [26-28]. 2006 年には OICETS と NICT 宇宙光通信地上センターとの低軌道衛星 - 地上局間双方向光衛星実験が行われた. これらの成果により, 日本は世界初となる 3 つの衛星光通信に成功した [29-32]. 2007 年には, DLR から TerraSAR-X と呼ばれる 5.6Gbps で通信が可能な光通信装置を搭載した地球観測衛星が打ち上げられた [33]. 2008 年から 2009 年にかけて再度 OICETS 実験が行われ, ジェット推進研究所 (JPL), ドイツ航空宇宙センター (DLR), ESA の各光地上局が衛星 - 地上間光通信実験に成功した [34-36]. 2013 年には, 月 - 地球間光通信を行うことができる月探査衛星 (LADEE) が打ち上げられ, 実験が成功した [40]. 2014 年 4 月時点までの宇宙光通信の実証例は, 数例しか無い.

これまでの宇宙光通信の研究で, 宇宙と地上間または衛星間において宇宙光通信が可能であることが証明された. それに伴い, 各国の宇宙機関が集まる会合において, 宇宙光通信の標準化に対する議論が始まっている [37]. 衛星 - 地上間光通信において, レーザ波長が, 800nm 帯, 1000nm 帯, 1500nm 帯の実証実績があり, 今後, 主に使用される波長帯として, 1000nm 帯と 1500nm 帯が注目されている. 特に 1500nm 帯は, 地上光ネットワーク装置に多く使われていること, 高感度センサが開発されたこと, 波長が長い方が大気の影響を受けにくいこと, アイセーフティであることから注目されている. しかし, 1500nm 帯については, 大気揺らぎの影響を受ける低軌道衛星 - 地上間光通信が行われた実績が無く, 波長の相違による大気揺らぎの影響を計測, 確認するために大気伝搬データを取得する必要がある. 変調方式としては, 強度変調, BPSK 通信が行われ, 通信速度は, 最大で 5.6Gbps が実証されている. また, 高精度なポインティング技術も実証されている. 宇宙光通信における誤り訂正符号については, Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) の地球から月探査衛星への一方向の RS 符号を用いた PPM 通信と TerraSAR-X の RS 符号を用いた実験がある [38,39]. また, 2013 年に打ち上げられた Lunar Atmosphere and Dust

Environmental Explorer (LADEE) satellite は, Serially Concatenated PPM (SCPPM) 符号が実装されている [40–42].

宇宙光通信の伝送実験を推進する必要があるが, 光を受信することができる地上局は限られ, 打ち上げられた衛星–地上間光通信が可能な衛星の数も少ないため, 光地上局で受信した伝搬データ自体が貴重である. 特に低軌道衛星–地上間光通信は, 静止軌道衛星に比べて, 衛星が高速に移動していることや距離や仰角における様々な違う条件でデータを取得することができるため, 多様な条件での伝搬モデルの作成を行うことができ, 大気揺らぎの影響を調べる上で有用である. また, 取得した貴重なデータの解析結果から, 通信品質の向上に役立てることができると思う.

定常的な通信手段として宇宙光通信を用いるためには, 衛星–地上間光通信における雲や大気揺らぎなどによる通信品質の劣化, 遮断という問題を解決する必要がある. この通信品質の劣化, 遮断は, 大気屈折率が温度, 気圧, 湿度, 二酸化炭素の濃度などに依存して変化し, 伝搬光の波面歪が生じるためである [43]. また, 衛星–地上間光通信において発生する通信エラーは, 符号シンボルが一つ欠落するようなエラーではなく, 連続した符号シンボルが欠落するバーストエラーが支配的である [44]. 今後の宇宙光通信の品質向上に必要な技術は, サイトダイバーシチ, 光アンプの使用, 誤り訂正符号の適用などが挙げられる.

サイトダイバーシチとは, 複数の地上局を用いて, 品質向上を図ろうとする概念であり, 雲や雨により目的の地上局と衛星–地上間光通信ができない場合に, 晴れている他の地上局を用いてデータを地上に送る方法である. RF 通信においてもキャリア周波数が高くなると雲や雨に対しての損失が大きくなるため, 同様の概念が研究されている [45, 46].

光通信は, 地上における情報通信ネットワークですでに使われている. 地上におけるシングルモードファイバを用いた光通信ネットワーク (以下, 地上光ネットワーク) は, 強度変調における通信が行われている [47]. 地上光ネットワークにおける通信容量は, インターネット上の動画コンテンツの普及などにより, 増加傾向にある [48]. 強度変調におい

て通信速度を増加させるためには、光アンプを用いて送信パワーを上げる手法が取られてきた。ただし、地上光ネットワークは、通信路であるシングルモードファイバの許容する光パワーの条件により、送信パワーアップによる光通信速度向上が困難になっている。そのため、通信速度を増加させるために、受信センサの高感度化や光のコヒーレント性を用いた通信方式が検討されている [49].

同様に、衛星-地上間光通信における通信品質の改善方法の一つとして、地上光ネットワークで用いられている光アンプの技術が検討されている。光アンプは、送信機、受信機の物理層に適用されるものである。衛星の送信装置に光アンプを搭載することで強い光を照射し、受信側に届くパワーを上げることにより大気揺らぎの影響を受けても信号のエラーを発生しにくくすることが可能になる。ただし、衛星搭載用光アンプは、宇宙環境下において動作するように部品や消費電力などを考慮する必要がある。光地上局における受信装置にも光アンプを使用することができる。受信した弱い光を光アンプで増幅することにより、入力光よりも強い出力光を得ることが可能となり通信品質が向上する [50,51]. なお、製品として入手できる多くの光アンプは、信号光の入力にシングルモードファイバを採用しているため、光アンプを使用する際には受信光をシングルモードファイバにカップリングすることが必要になる。

また、衛星-地上間光通信における通信速度を上げるためには、通信方式や誤り訂正符号について検討する必要がある。これまでの衛星-地上間光通信における通信方式は、強度変調直接検出 (Intensity modulation/Direct detection, IM-DD) 方式などの強度変調が行われてきた [29,52]. IM-DD 通信は、光の強弱によって通信を行うため、送受信の機器ともに簡易である。ただし、光が大気を通過して大気揺らぎの影響を受けると強度変動が発生するため、今後の通信速度の向上に対応するには、光の送信パワーを強くする必要がある [53,54]. 地上光ネットワークで使われている通信装置の多くは、シングルモードファイバによる入力を前提とした装置であるため、受信光をシングルモードファイバに導くことができれば、他の通信方式を容易に適用することができる。シングルモードファイ

バへのカップリングとは、光を約 $10 \mu\text{m}$ のコア径を持つシングルモードファイバへ導く技術であり、高度な制御技術が必要になる。従って、受信光をシングルモードファイバへカップリングすることは、安定した受信パワーを得るために重要な技術と考える。

一方、受信光の物理層より上の層に用いる技術として、誤り訂正符号がある。誤り訂正符号は、大気揺らぎにより発生する信号損失を補うことができ、デジタルデータに変換した後に適用される。誤り訂正符号は、インターネットや携帯電話など多方面に用いられている。ただし、衛星-地上間光通信のように大気揺らぎを受けた場合に、どのような誤り訂正符号が適切なのか、バーストエラーに対応するにはインタリーブをどのように適応させれば良いかなどは、研究を継続し、実験により検証する必要がある。また、地上側から衛星にアップリンクを行う場合と衛星から地上にダウンリンクを行う場合とでは大気揺らぎを受ける影響が相違するため、地上側、衛星側ともに大気揺らぎに適した符号手法や符号パラメータやインタリーブの長さなどを検証する必要がある [55-58]。

今後のさらなる衛星通信における伝送速度の高速化のために、地上で使われている高速化の手法である WDM（光波長多重通信）やコヒーレント通信などを用いた実証実験を行ない、衛星-地上間における大気揺らぎによる影響を観測、確認する必要がある。また、低軌道衛星-地上間における符号実験が少ないため、符号の種類の見直しや符号パラメータ、インタリーブ長さなどの最適なパラメータを検証し、実証する必要がある。

1.2 研究目的

本論文では、宇宙光通信における通信品質の安定化と向上および伝送速度の向上を目的として、大気揺らぎの影響を低減させる手法の適用を試みる。この大気揺らぎによる通信品質の改善を、第1の手法は物理層に適用するものであり、高速で2軸に動作可能なミラーを持つ精追尾機構を用いて受信光をシングルモードファイバへのカップリングする技術を採用する。第2の手法は、物理層より上の層に適用される。送信側でまず符号化を行い、大気を伝搬して発生したエラーを、受信側でエラーしたデータを訂正することができ

る誤り訂正符号を検討する。

第1の手法のシングルモードファイバへのカップリングする技術の先行研究として、シングルモードファイバから伝搬した光を空間に射出し、短い距離の空間を伝搬させて他のシングルモードファイバへカップリングするスイッチング技術（以下、短距離空間ファイバカップリング技術）が研究されている。この技術は、Micro Electro Mechanical Systems(MEMS)を用いた光通信用光スイッチや液晶を用いたファイバカップリング装置などに活用されている [59-62]。

現在、これらの短距離空間ファイバカップリング技術は、光の波面の均一性などの条件を必要とする。衛星-地上間光通信を行う場合、大気揺らぎによって受信光の波面が歪み、地上局で観測する到来角度も一定ではなくなる。そのため、シングルモードファイバへのカップリングは、大気揺らぎにより更に難しくなる。歪んだ波面を同一位相に揃える技術として波面補償光学があり、すでに低速可動する装置は存在しているが、大気揺らぎの変動に対して追尾することが可能な装置の製作は困難である [63-65]。そのため、本論文では、調べた限りでは世界で初めて、低軌道衛星-地上間光通信において、高速で2軸に動作可能なミラーを保有する精追尾機構を用いたシングルモードファイバへのカップリングの実証実験を実施する。使用した精追尾機構は、デフォーマブルミラーよりも安価で、大気揺らぎの主要な周波数成分よりも高速動作が可能な追尾機能を保有する装置である [66]。

理論的な面での先行研究としては、水平方向に空間光通信を行い受信光をシングルモードファイバへカップリングする効率を算出する理論、制御装置のジッターによるシングルモードファイバへのカップリング効率の理論、星の光を用いた場合のシングルモードファイバへのカップリング効率の理論などがある [67-69]。ただし、衛星-地上間光通信のような高度の変化にも対応したシングルモードファイバへのカップリングの理論式は、現時点では、報告されていない。そのため、本論文では、水平方向に空間光通信を行い受信光をシングルモードファイバへのカップリング効率を算出する理論から、新たに高度への変

化に対応したシングルモードファイバへのカップリング効率の理論式を提案し、衛星-地上間光通信におけるシングルモードファイバへのカップリング効率に適用させ、実証実験との比較を行い、新たな理論式の妥当性を示している。

第2の手法として、誤り訂正符号の検証を実施する。誤り訂正符号は、衛星のRF通信においても用いられており、主に畳み込み符号や複数の符号を合わせた畳み込み符号-ビタビ復号とRS符号の接続符号が使われている [70,73]。地上にける空間光通信においては、ターボ符号やアラモチ符号などによる水平伝搬実験や大気伝搬におけるエラーの検証が行われている [71,72]。宇宙光通信では、RS符号を用いた通信実験が2例ほど報告されている [38,39]。本論文では、適用する符号として、Low Density Generator Matrix(LDGM)符号を用いて検証している [74]。LDGM符号は、Low Density Parity Check (LDPC) 符号の一種で、近年、注目を集めている符号の一つである。LDGM符号は、誤り訂正符号の中でも訂正能力が高く、符号長を自由に決めることができる。また、符号化の速度がLDPCよりも高速であり、符号の復号化時に並列処理が可能であるため、今後の高速通信への対応にも有効と考える [75,76]。

通信品質の検証をシミュレーションにより行う際には、伝搬モデルを用いる検証方法が広く実施されている。RF通信に用いられる伝搬モデルは、先行研究で坂上モデルや坂上モデルを拡張したモデルなど、すでに広く使用されている伝搬モデルが存在する [77,78]。衛星-地上間におけるRF通信と空間光通信を行う際に発生する符号の誤りの傾向を比較すると、空間光通信の方が基本的に連続した符号が欠落するバーストエラーが支配的である。バーストエラーによる符号誤り量を減らす方法として、インタリーブがあり、符号パラメータとして本論文で検証している。インタリーブの値を長くするとバーストエラーによる影響を低減できるが、インタリーブを適用した範囲のデータをすべて受信した後にしか復号処理を行うことができない。そのため、バーストエラーに効果的な長さのインタリーブは、できるだけ短時間が望ましいと考える。

低軌道衛星-地上間光通信においては、実証例がまだ少なく十分な実験データがない

ため、RF通信のような広く使われている伝搬モデルは存在しない。本論文では、実際に OICETS 実験で得られたデータに基づく伝搬モデルを用いて [79]、シミュレーションにより通信品質を検証する。実験のデータから得られたモデルであるため、伝搬モデルの一例であるが、実際の衛星-地上間光通信実験のデータに基づく通信品質の検証は有意義である。この伝搬モデルを用いて衛星-地上間光通信における誤り訂正符号の最適なインタリーブ長さを検証する。

本論文では、衛星-地上間光通信の物理層に対する光地上局受信技術による品質向上の手法として、大気揺らぎによる変動にも対応した精追尾機構を用い、大気揺らぎを低減させ、シングルモードファイバへのカップリング実証と高さ方向の変化に対応したシングルモードファイバへのカップリング効率の理論式を提案し、衛星-地上間光通信におけるシングルモードファイバへのカップリング効率に適用させ、実証実験との比較を行い、新たな理論式の妥当性を示している。また、信号をデジタルに変換した後の技術として、実際に実験で得たデータに基づく伝搬モデルを用いて、誤り訂正符号のパラメータの検証を行い、最適なインタリーブ長さを検証している。この2点の技術により低軌道衛星-地上局間光通信における通信品質向上について検証を実施した。

1.3 論文構成

第2章では、宇宙光通信を行う上で問題になる大気揺らぎと3章以降に行う数値シミュレーションで用いる理論式について述べる。具体的には、大気揺らぎの大きさを示すシンチレーションやシングルモードファイバへのカップリング理論の検証で必要なる大気揺らぎの構造関数モデルについて述べている。3章では、衛星-地上間光通信実験におけるシングルモードファイバへのカップリング効率についての理論と実証実験について述べる。衛星-地上間光通信における大気揺らぎを考慮し、これまでの水平伝搬路のモデルに対して斜め方向の伝搬路に適応する理論式を新たに提案し、数値シミュレーションにてシングルモードファイバへのカップリング効率を検証する。また、実際に低軌衛星である OICETS

を用いて、衛星-地上間の伝搬路における大気揺らぎを受けた受信光を精追尾機構を用いて、シングルモードファイバに受信光を導く実験を実施する。このファイバカップリング効率の数値シミュレーションによる計算結果と、実験結果の比較検証を行うことにより、シングルモードファイバへのカップリング損失について考察する。4章では、大気揺らぎに対する誤り訂正符号の有効性を LDGM 符号を用いて検証している。ただし、衛星-地上間光通信における符号化の研究はまだ少なく、現時点で大気揺らぎに対して最適な方法が提示されていない。ここでは、大気揺らぎに適した誤り訂正符号と符号パラメータの検討のため、OICETS を用いた衛星-地上間光通信実験から得た大気揺らぎのデータを解析し、構築した伝搬モデルを活用している。この伝搬モデルを用いて衛星-地上間光通信における誤り訂正符号の最適なインタリーブ長さを検証する。最後に、5章では結論と今後の課題について述べる。

第2章 衛星-地上間光通信における技術項目

本章では、はじめに、大気揺らぎの概要について延べた後に、大気揺らぎ理論、衛星-地上間光通信におけるシミュレーション等に広く使われている大気揺らぎの大きさを示す屈折率構造パラメータについて述べる。また、屈折率構造パラメータのモデルとして広く使われている、Hufnagel-Valley モデル、SLC モデルの相違点について述べる。次に、シングルモードファイバのカップリング効率や通信品質を低下させる要因となる、光のシンチレーションや到来角度変動、スペckルパターンについて述べる。

2.1 大気揺らぎの概要

大気揺らぎとは気温の変化による大気の屈折率の変動や、風とそれによって生じる対流、乱流などの影響によって光の到来角が変動したり、波面歪みが生じるなどで起こる強度変動である。衛星-地上間光通信においては、大気揺らぎの影響によって信号光の受信レベルが変動してしまい、その結果通信品質の劣化を招く。その減衰の大きさは 20dB 以上にもなる。大気が風によりランダムに動いているため、大気中での屈折方向や屈折率が絶えず変化している。屈折が変化する主な原因は大気中の温度差であり、地上から高度 20km 程度まで存在する大気中での温度差が光信号の大きな劣化原因となる [80]。また、大気中の風速による影響もあるため、偏西風によってジェット気流が発生すると大気揺らぎがさらに大きくなり、光信号の劣化が増大する。透過損失も水蒸気や雲に起因しており、雲が厚くなると光の散乱や吸収により透過損失が大きくなるため、地上から衛星へ、衛星

から地上へ光を伝送することができなくなる。大気を介した伝送では、大気屈折率、大気揺らぎの影響により光強度変動（シンチレーション）が生じる。

2.2 大気揺らぎのモデル

2.2.1 大気揺らぎ理論

光の周波数領域における大気の屈折率は式 (2.1) で求められる [80].

$$n = 1 + 77.6(1 + 7.52E^{-3}\lambda^{-2})\frac{PE^{-6}}{T} \quad (2.1)$$

ここで λ は光の波長 (μm), P は気圧 (mbar) を表し, また T は絶対温度をである. 光の波長に対する屈折率の変化は, 気圧よりも温度の変化が主要因である. $\lambda = 1.5\mu\text{m}$ のとき, 温度が微小変化 dT したときの屈折率の変化 dn は式 (2.2) となる.

$$dn = -\frac{77.9P}{T^2} \times 10^{-6}dT \quad (2.2)$$

大気中におけるランダムな屈折率の揺らぎは, 大気中における不均一な温度分布によって生じる. これは, 太陽からの光が地上を不均一に温めるためであり, また風の流れによってさらに均一性が細かく碎かれ, 大気揺らぎの影響が大きくなる. 屈折率の不均一性のことを乱れた「渦」と呼んでいる. この「渦」は, 各々ごとに固有の屈折率をもつ大気の群れとみることができる. 一様な乱れのパワースペクトル密度 $\Phi_n(\kappa)$ は, 大きさが $L_x = 2\pi/\kappa_x$, $L_y = 2\pi/\kappa_y$, $L_z = 2\pi/\kappa_z$ の渦がどれだけたくさん含まれているかを相対的に表す尺度と考えることができる. 等方性をもつ乱れの場合には, κ と渦の大きさ L との関係は $L = 2\pi/\kappa$ となる. この現象におけるスペクトル関数として Kolmogorov が広く使われていが, 表現できる領域が限られている. Φ_n の関数形は乱流に関する物理法則から予測することができる. Kolmogorov の理論による慣性小領域の領域における Φ_n の関数は式 (2.3) となる [80,81].

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033C_n^2\kappa^{-11/3} \quad (2.3)$$

ここで、 C_n^2 は屈折率構造パラメータと呼ばれるもので、揺らぎの強さを示す。式 (2.3) には、限界領域が存在し、 κ が臨界波数 L_m に近づくと Φ_n の関数は Kolomogorov スペクトルの領域から外れてしまう。そのため、大気特性からずれたスペクトルを示してしまう。スケールサイズより小さな乱流の渦においては、粘性力のためにそのエネルギーを散逸させ、その結果 Φ_n は早く減衰する。このモデルを Tatarski により拡張が行われ、 $\Phi_n(\kappa)$ の早い減衰を式 (2.4) で表すことができる。

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033C_n^2\kappa^{-11/3}\exp\left(\frac{-\kappa^2}{\kappa_m^2}\right) \quad (2.4)$$

式 (2.3) と式 (2.4) のスペクトルはともに積分不可能な極を原点に持っている。地球の大気は有限であるが、式 (2.4) の $\kappa \rightarrow 0$ にしたときにこれらのスペクトルが無限の値を示す。このモデルのもつこのような欠点を克服するために、Von Karman スペクトルとして知られているスペクトルの関数形が用いられる。そのスペクトルは近似的に式 (2.5) で表される [82]。

$$\Phi_n(\kappa) = \frac{0.033C_n^2\exp(-\kappa^2/\kappa_m^2)}{(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{11/6}} \quad (2.5)$$

ここで $\kappa_m = 5.92/l_0$ 、 $\kappa_0 = 2\pi/L_0$ であり、 l_0 は大気揺らぎの空間分布の最小スケール、 L_0 は最大スケールを表す。式 (2.5) を用いることで、極小領域でも無限に近くなる値でも大気特性に似たスペクトルを導くことができる。

2.2.2 SLC モデル

大気の状態を表す構造関数モデルとして、実験や解析により幾つか提案されている。広く使われているモデルの一つとして、SLC モデルがある [83]。SLC モデルは、ハワイのマ

ウワ島ハレアカラ山にある air force maui optical station(AMOS) において取得したデータを元に作成された屈折率構造パラメータである [84]. SLC モデルは, daytime モデルが式 (2.6), night モデルが式 (2.7) である. h は高度, C_n^2 は, 屈折率構造パラメータで大気揺らぎの強さを示している. 大気揺らぎは地表面に近いほど影響が大きく, 高度が上がるに連れて大気揺らぎによる影響が小さくなる. C_n^2 が 10^{-13} 以上の場合を強い大気揺らぎ, 10^{-17} 以下を弱い大気揺らぎと言われている [82]. また, SLC モデルにおける高度と屈折率構造パラメータの関係を図 2.1 に示す. daytime モデルと night モデルの相違は, 高度 1500m 以下の値が違うことにある. これは, 日中太陽の放射により地表面が暖められ, その温度変化の影響が daytime モデルと night モデルの差になる. SLC モデルは, 広く使われているが AMOS で計測されたデータを元に行っているため, 他の地域で行う場合, C_n^2 の値に誤差が生じる問題がある.

$$\begin{aligned}
C_n^2(h) &= 1.7 \times 10^{-14}, & 0 < h < 18.5 \text{ m} \\
&= 3.13 \times 10^{-13}/h^{1.05}, & 18.5 < h < 240 \text{ m} \\
&= 1.3 \times 10^{-15}, & 240 < h < 880 \text{ m} \\
&= 8.87 \times 10^{-7}/h^3, & 880 < h < 7200 \text{ m} \\
&= 2.0 \times 10^{-16}/h^{1/2}, & 7200 < h < 20000 \text{ m}
\end{aligned} \tag{2.6}$$

$$\begin{aligned}
C_n^2(h) &= 8.4 \times 10^{-15}, & 0 < h < 18.5 \text{ m} \\
&= 2.87 \times 10^{-12}/h^2, & 18.5 < h < 240 \text{ m} \\
&= 2.5 \times 10^{-16}, & 240 < h < 880 \text{ m} \\
&= 8.87 \times 10^{-7}/h^3, & 880 < h < 7200 \text{ m} \\
&= 2.0 \times 10^{-16}/h^{1/2}, & 7200 < h < 20000 \text{ m}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

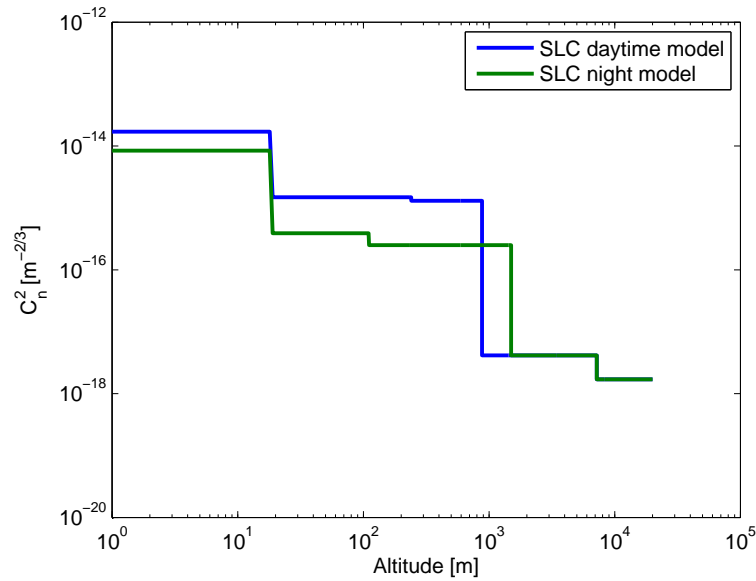


図 2.1: SLC モデルにおける高度と屈折率構造パラメータの関係

2.2.3 Hufnagel-Valley モデル

SLC モデルの問題点である地域による C_n^2 の相違を表すことが可能になる大気モデルとして、式 (2.8) の Hufnagel-Valley (H-V) モデルがある。

$$\begin{aligned}
 C_n^2(h) = & 0.00594(v/27)^2(10^{-5}h)^{10} \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) \\
 & + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + A \exp\left(-\frac{h}{100}\right)
 \end{aligned} \quad (2.8)$$

h は高度、 v はバフトン風速モデルによる疑似風速、 A は、地上における C_n^2 の値を用いる。ここで用いられるビームはガウスビームであり、コリメートされたビームを用いている。H-V モデルは、関数で示せるため、 v と A を実験を行う場所で計測した値を用いることで、SLC の問題点であった地域による違いを表現することができる。式 (2.8) を用いて高度と $C_n^2(h)$ のグラフを作成すると図 2.2 のグラフが得られる。 A の値を変化させると高度 1km 以下の C_n^2 に影響があり、 v の値を変化させると高度約 10km の C_n^2 に影響があることが確認できる。また、図 2.2 において 10km あたりで $C_n^2(h)$ が高くなっているのは大

気境界層にジェット気流帯があるためである。

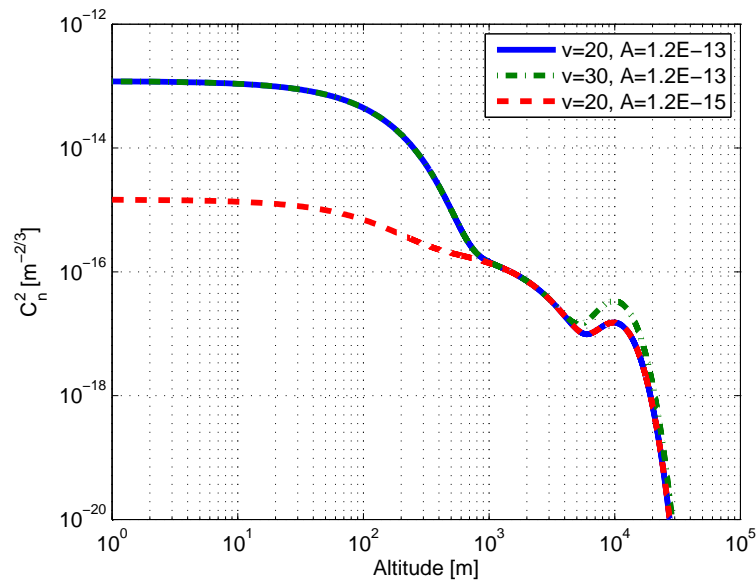


図 2.2: H-V モデルにおける高度と屈折率構造パラメータの関係

2.3 空間光通信に関する理論

2.3.1 シンチレーション

シンチレーションとは、光が時間的・空間的に変動することによって発生する強度変動である。大気中の場合、温度変化などで空気の屈折率がランダムに変化することで発生する。例としては、夜に星を観測した時に起こる星のまたたきもシンチレーションにより起こる。シンチレーションインデックスは、大気変動の強さを示す指標で正規化されている。このシンチレーションインデックスが1を超えると強い揺らぎであると言われている。シンチレーションインデックスは式 (2.9) により求めることができる [85,86]。 I は、受信地点における照射強度であり、 $\langle I \rangle$ は時間平均を表す。

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (2.9)$$

2.3.2 到来角度変動

到来角度変動とは、図 2.3 のように、レーザが大気を伝搬する際に大気揺らぎによって屈折が起こり、本来直進するはずのレーザがあたかも破線のように到来角度が変化して受信側で観測される現象である。

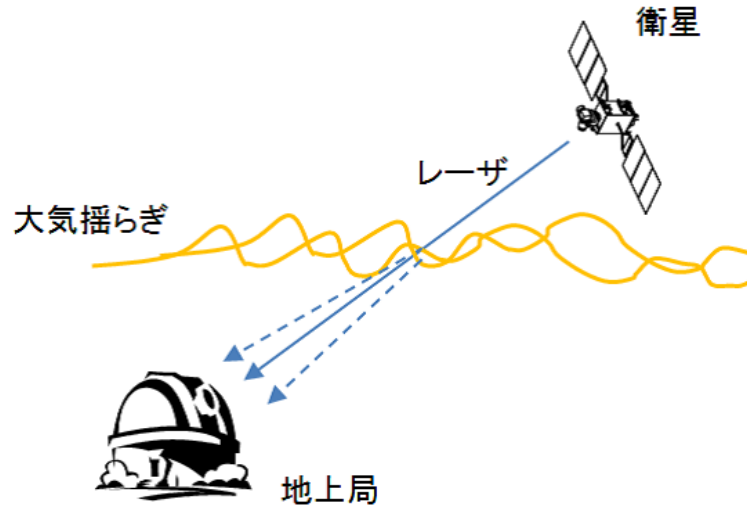


図 2.3: 到来角度変動の概要図

ダウンリンク受信時における、到来角度変動は式(2.10)によって求めることができる [87].

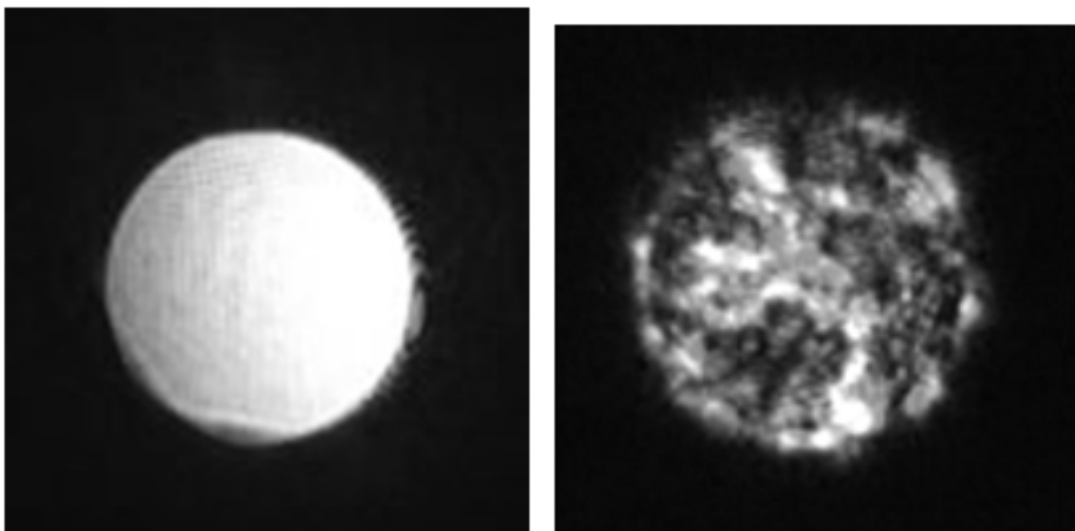
$$\sigma_{\beta}^2 = 2.91\mu_0 \sec(\zeta)(2W_G)^{-1/3} \quad (2.10)$$

$$\mu_0 = \int_{h_0}^H C_n^2(h)dh, \quad (2.11)$$

ζ は天頂角度、 W_G は受信アンテナの半径、 h_0 は受信アンテナの高度、 H は衛星の高度である。到来角度変動は、大気揺らぎによる角度変化を表している。

2.3.3 スペックルパターン

スペックルパターンとは、図2.4(a)の様な均一な光の強度分布が大気を通過することで図2.4(b)のように斑点(スペックル)が発生する現象である。図2.4(b)は、2008年に低軌道衛星 OICETS からの受信光をカメラで実際に撮像したものを示している。スペックルの発生原因は大気の屈折率にあり、大気を通過する際に大気揺らぎにより発生する大気の屈折率の変化が、受信点において強度分布が重なることにより発生する。大気は絶えず動いており均一でないため、光源が屈折し受信部に到達するまでの光路長が変化する。このスペックルは、レンズで光を集光させたときの収差を発生させるため、シングルモードファイバへのカップリング効率を低下させる要因となっている。



(a) 大気通過前のレーザー光源の強度分布

(b) 大気通過後のレーザー光源の強度分布

図 2.4: OICETS 実験で取得したスペックルパターン

2.4 まとめ

この章では、衛星-地上間光通信を行う上で品質劣化の問題となる大気揺らぎについて述べた。衛星と地上間において光通信を行うには大気を伝搬する。大気は絶えずランダムに動き続けているため、大気揺らぎの影響を受け、光の強度変動が起こることが、通信品質の劣化の原因になる。衛星と大気揺らぎによる屈折率の変化は、主に大気中の温度分布を持つ空気が風で移動することによって生じ、シンチレーション、到来角変動、スペックルパターンなどが発生する。代表的な大気の強度変動のスペクトル分布を表す関数として、Kolmogorov スペクトルや Tatarskii スペクトル、Von Karman スペクトルについて紹介した。Von Karman スペクトルは、極小領域でも無限に近い値においても大気の特徴から外れないため、4章で用いる衛星-地上間光通信における大気伝搬モデルは、Von Karman スペクトルを元に作られている。屈折率構造パラメータ C_n^2 を表すモデルとして、ハワイのマウワ島ハレアカラ山で取得したデータを用いて算出された SLC モデルと他の場所でも変数を変えることで屈折率構造パラメータ C_n^2 を表すことができる Hufnagel-Valley モデルの違いについて述べた。

第3章 衛星-地上間光通信実験における ファイバカップリング実験

本章では、衛星-地上間光通信における精追尾機構を用いたファイバカップリング効率の計測実験の結果を示している。はじめに、水平伝搬における空間光通信のファイバカップリング理論から傾斜変化に対応した宇宙光通信のファイバカップリング理論への拡張を行った。また、今回の実験では、大気揺らぎの変動に追従できるように高速な精追尾機構を用い、大気揺らぎを抑制して衛星-地上間光のファイバカップリング実験を行った。最後に高度化に対応した宇宙光通信のファイバカップリング理論のシミュレーション結果と実際に OICETS を用いてファイバカップリング実験を行った結果との比較をしている。

3.1 シングルモードファイバへのカップリング理論式

3.1.1 大気揺らぎ存在下での水平伝搬ファイバカップリング理論

大気揺らぎ存在下での水平伝搬ファイバカップリング理論とは、図 3.1 のように水平にレーザ伝搬を行った場合のシングルモードファイバへのファイバカップリング効率を計算している。この理論は、装置における追尾誤差は無いものとし、大気揺らぎのみの影響を調べている。

大気揺らぎ存在下における水平伝搬ファイバカップリング効率は、式 (3.1) によって求めることができる [68]。

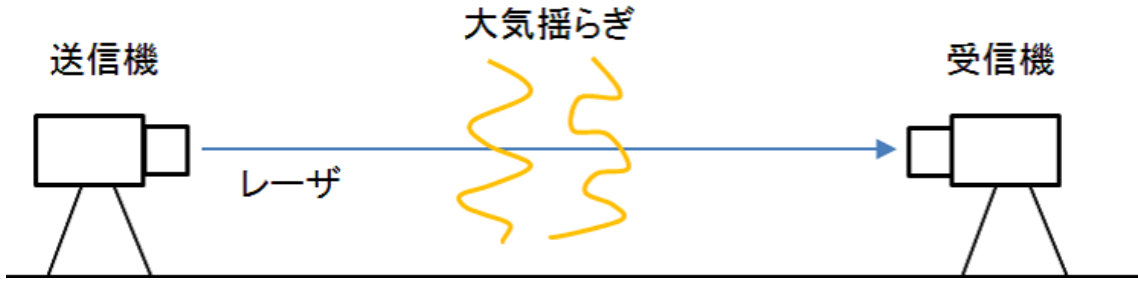


図 3.1: 大気揺らぎ存在下での水平伝搬ファイバカップリングのシステム概要

$$\eta_c = 8a^2 \int_0^1 \int_0^1 \exp[-(a^2 + \frac{A_R}{A_C})(x_1^2 + x_2^2)] \times I_0(2\frac{A_R}{A_C}x_1x_2)x_1x_2 dx_1 dx_2 \quad (3.1)$$

$$a = \frac{D_R \pi W_m}{2 \lambda f} \quad (3.2)$$

$$A_c = \pi \rho_c^2 \quad (3.3)$$

$$A_R = \frac{\pi D_R^2}{4} \quad (3.4)$$

$$\rho_c = (1.46 C_n^2 k^2 L)^{-3/5} \quad (3.5)$$

D_R は受信レンズの直径、 W_m はファイバのモードフィールド半径、 λ は光の波長、 f はレンズの焦点距離、 L は通信距離、 k は光の波数である。 A_c は、大気揺らぎによって発生するスペックルの1つの面積を示しており、 A_R は、受信開口径の面積を示している。

3.1.2 大気揺らぎ存在下での水平伝搬ファイバカップリング効率

大気揺らぎを考慮した水平伝搬ファイバカップリング効率のシミュレーションを行った。このシミュレーションでは、追尾誤差は無いものとして行われている。図3.2は、 $f = 0.2m$ 、 $D_R = 0.1m$ 、 $\lambda = 1550nm$ として、 C_n^2 を変化させたときのファイバカップリング効率のシミュレーション結果を示す。

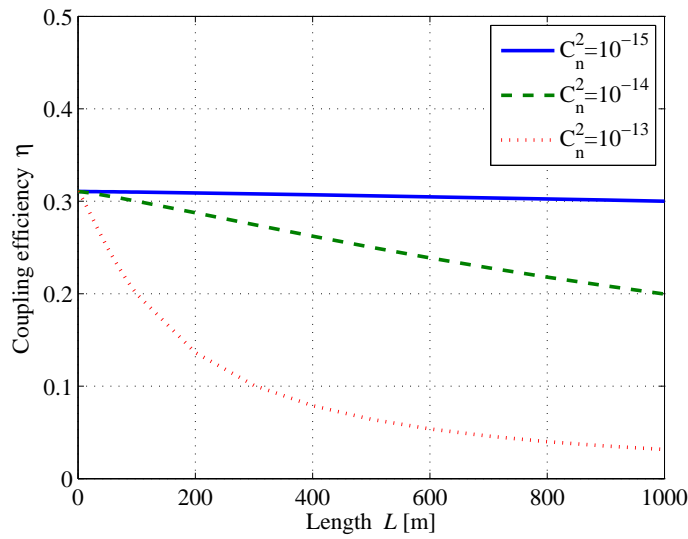


図 3.2: 伝搬距離と C_n^2 によるファイバカップリング効率

C_n^2 が 10^{-15} の時は、ほとんどファイバカップリング効率に変化が認められないが、 C_n^2 が 10^{-14} になると、通信距離に比例してファイバカップリング効率が低下している。さらに、 C_n^2 が 10^{-13} になると、大きくファイバカップリング効率が低下する。一般的に C_n^2 が 10^{-13} になると強い大気揺らぎと言われている [82]。

次に、前述のシミュレーションと同一の設定で、 C_n^2 を 10^{-13} に設定してレーザーの波長を変化させた場合のシミュレーション結果を図 3.3 に示す。ファイバカップリング効率は、波長の違いによって減衰傾向に大きな違いは無かった。1550nm は、850nm と比べてシングルモードファイバへのカップリング効率が 3 倍ほど良い。これは、波長が長くなることによって、 a の値が小さくなり、 ρ_c のスペックルのサイズが大きくなるため、波長が長くなるとシングルモードファイバへのカップリング効率が良くなる。

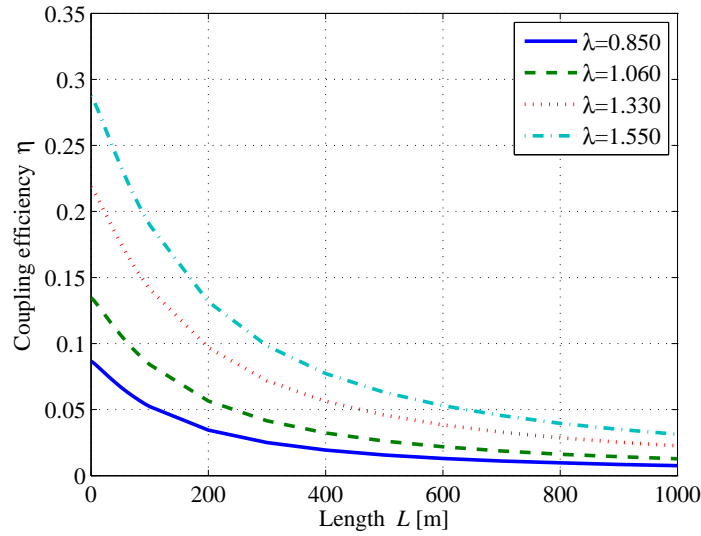


図 3.3: 伝搬距離と波長の違いによるファイバカップリング効率 ($C_n^2 = 10^{-13}$)

3.1.3 衛星-地上間光通信に拡張したファイバカップリング理論

式 (3.1) を用いることで、水平伝搬におけるシングルモードファイバへのカップリング効率を求めることができる。ただし、衛星-地上間光通信の様に高度に変化した通信路において、使用することができない。その理由は、大気揺らぎの強さを示す大気屈折率構造パラメータ C_n^2 が、高度により変化し、高度が高くなるに連れて C_n^2 が小さくなることを表現することができないためである。

式 (3.1) を高度の変化に対応した式に拡張するには、第 2 章で説明した Hufnager-Valley モデルの大気屈折率構造パラメータ C_n^2 を使用する。H-V モデルは、 A と v を変化させることで、観測点による違いを表現することができる。そして、 ρ_c に式 (2.8) を適応させると、高度の変化に対応した ρ_z は

$$\rho_z = [1.46k^2 \frac{1}{\cos(\zeta)} \int_{h_0}^H dz C_n^2(z)]^{-3/5} \quad (3.6)$$

となる。大気屈折率構造パラメータ C_n^2 は、その通信路の全体の大気揺らぎの大きさを示

すため、通信路の長さの合計値を示す必要があり、積分することで通信路の合計値を求めている。また、高度 H は観測地点の高度、天頂角と通信距離から求めることができ

$$H = h_0 + L \cos(\zeta) \quad (3.7)$$

となる。 h_0 は光を受信する望遠鏡の高度、 L は通信距離、 ζ は天頂角である。 H-V モデルのパラメータである v はバフトン風速モデルであり、 A は東京都小金井市にある NICT の光地上局で計測した値である $1.2 \times 10^{-13} m^{-2/3}$ となり、また、 h_0 は 122m である [32]。これによりファイバカップリング効率は

$$\begin{aligned} \eta_z = 8a^2 \int_0^1 \int_0^1 \exp[-(a^2 + \frac{A_R}{A_z})(x_1^2 + x_2^2)] \\ \times I_0(2\frac{A_R}{A_z}x_1x_2)x_1x_2dx_1dx_2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$A_z = \pi\rho_z^2 \quad (3.9)$$

で与えられる。

3.1.4 シミュレーション

本章では、衛星-地上間光通信のように、高度の変化により大気屈折率構造パラメータが変化する伝搬路の場合に、ファイバカップリング効率がどのようになるかを確認するために、水平伝搬の理論の拡張を行っている。大気揺らぎ存在下における水平伝搬のファイバカップリング効率は、式 (3.1) によって求めることができる。水平伝搬の場合は屈折率構造パラメータを一定として扱うことができる。今回の数値シミュレーションは、新しく高度の変化にも対応するように大気揺らぎを考慮したファイバカップリングの理論式 (3.8) によってシミュレーションを行っている。

$D_R = 0.318m$, $W_m = 5.2\mu m$, $\lambda = 850nm$, $f = 0.1m$, $L = 1000m$, $h_0 = 122m$, $\zeta = 58^\circ$ とし、第2章の式 (2.8) の C_n^2 のパラメータである A の値を変化させた場合のグ

ラフを図 3.4 に示している．大気の屈折率構造パラメータが大きくなるとファイバカップリング効率が大きく低下する．例えば，ファイバカップリング効率を $1/10$ に抑えるには $A = 3 \times 10^{-14}$ 以下の値に抑えるような大気揺らぎの条件が必要となる．特に波長が 1550nm は，落ち込みが大きく 10^{-15} で効率が 0.7 ほどであるが， 10^{-13} になると 0.1 ほどになり， $1/7$ にまでファイバカップリング効率が低下している．波長が長い方が大気揺らぎによる影響を受けにくいいため，ファイバカップリング効率が他の波長と比べて良いことが分かる．

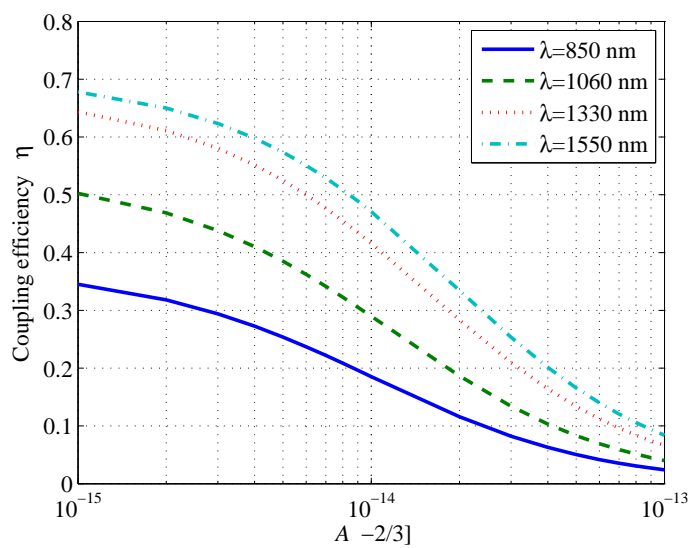


図 3.4: 式 (2.8) の A を変化させたときのファイバカップリング効率 ($L = 1000\text{m}$)

天頂角度を変えた場合どのようにファイバカップリング効率が変化するか，シミュレーションを実施した結果を図 3.5 に示している．通信距離が短い範囲では，大気は高度約 20km ほどまで存在するため，ファイバカップリング効率が低下している．通信距離が長くなるにつれて高度による大気揺らぎの強さに差が生じ，ファイバカップリング効率にも差が生じている．天頂角度が 0 度 (仰角では 90 度) の場合は一番大気の層が薄くなるため，ファイバカップリング効率が一番良くなる．逆に天頂角度 90 度の場合は大気の層が一番厚くなるため，最もファイバカップリング効率が低くなる．今回のシミュレーション

では、天頂角度が0度と30度ではそれほど差が生じない傾向であることを確認できた。

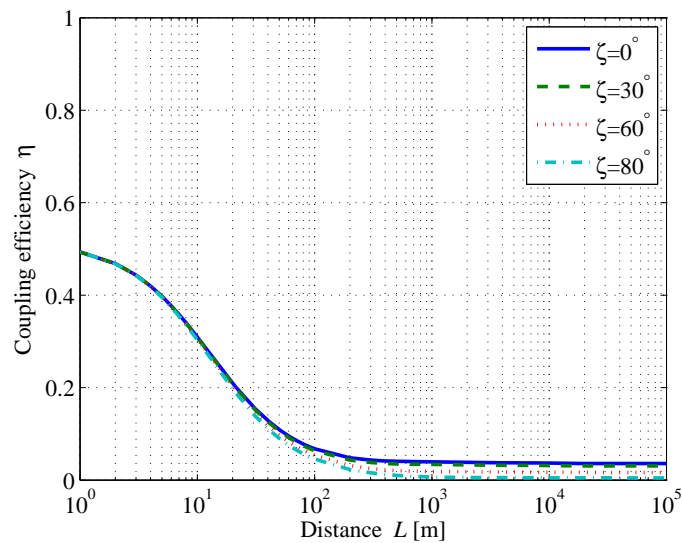


図 3.5: 天頂角度と高度の変化に対するファイバカップリング効率

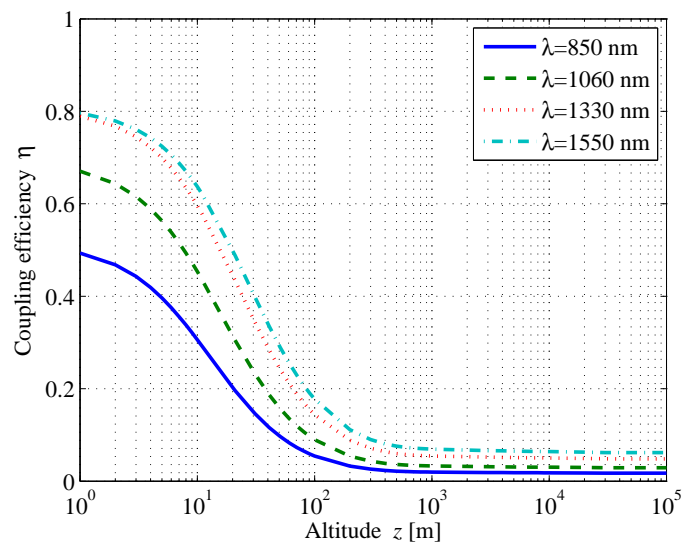


図 3.6: 高度と波長の変化に対するファイバカップリング効率

高度 z を変化させ、光の波長帯を 850nm, 1060nm, 1330nm, 1550nm に設定した場合のファイバカップリング効率を図 3.6 に示している。高度 z が 10km ほどになるとファイ

バカップリング効率に変化がなくなる。これは、高度が高くなることにより大気の影響が減少したためである。

3.1.5 水平伝搬と高度変化に対応した理論式の比較

水平伝搬におけるファイバカップリングの理論式 (ρ_c) と拡張した高度の変化に対応したファイバカップリングの理論式 (ρ_z) との比較を図 3.7 に示す。

使用したパラメータは、前述のシミュレーションと同じ値を使用し、水平伝搬におけるファイバカップリングの理論式で用いられる C_n^2 の値は、H-V モデルの式 (2.8) の高度の値を観測地点の高度が 122m として、 $C_n^2(122)$ を求めて使用している。

水平伝搬におけるファイバカップリングの理論式で得られるファイバカップリング効率は、拡張した高度の変化に対応したファイバカップリングの理論式と通信距離が短い場合同じような曲線を描いている。

通信距離が 100m ほどではファイバカップリング効率に差が広がり、距離が長くなるに連れて差が拡大する。また、今回のシミュレーションで用いたパラメータでは、強い大気揺らぎを仮定しているため、水平伝搬におけるファイバカップリング効率の通信距離が 1000m を超えた辺りで ρ_c の値が小さくなりすぎて 0 に収束してしまう。高度の変化に対応したシングルモードファイバへのカップリング効率 ρ_z は、自然現象における高度が高くなると C_n^2 の値が小さくなることを表すことができているため、より実測に近い値を算出することができる。

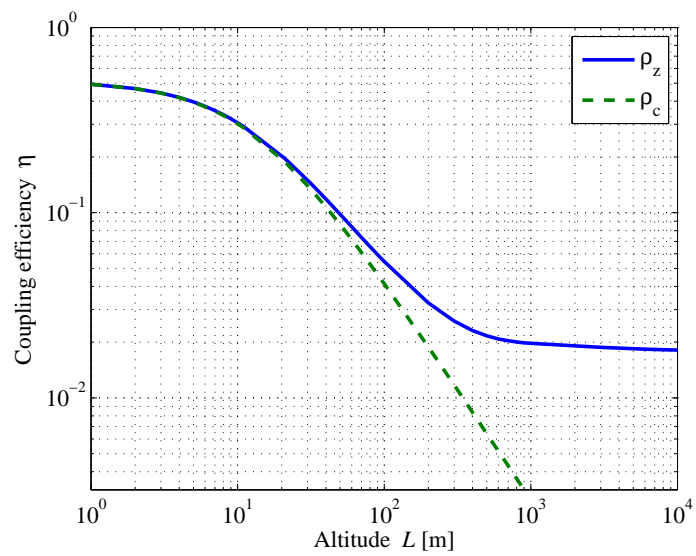


図 3.7: 水平伝搬におけるファイバカップリングの理論式 (ρ_c) と拡張した高度の変化に対応したファイバカップリングの理論式 (ρ_z) との比較

3.2 実験システム概要

実際に低軌道衛星 OICETS を使用して、衛星-地上間光通信実験を実施した。この通信実験の実施項目の一つとして、精追尾機構が大気揺らぎの影響を低減してどの程度シングルモードファイバにカップリングできるかを確認する実験がある。実験システムの概要は図 3.8 のようになっており、まず JAXA にある筑波宇宙センターから、事前に OICETS に対して実験時に必要な衛星コマンドが予め OICETS に送信される。その後、衛星が小金井にある NICT の光地上局から可視可能な範囲にはいると予め設定されている衛星コマンドを実行する。光通信の開始方法は、まず地上からビーコン光を衛星の予測方向に照射する。そして OICETS に照射されたビーコン光を捕捉し、ビーコン光の発射方面に向かってレーザの照射を開始する。OICETS から照射されたレーザを望遠鏡で受信できれば、衛星-地上間における双方向光通信が開始される。

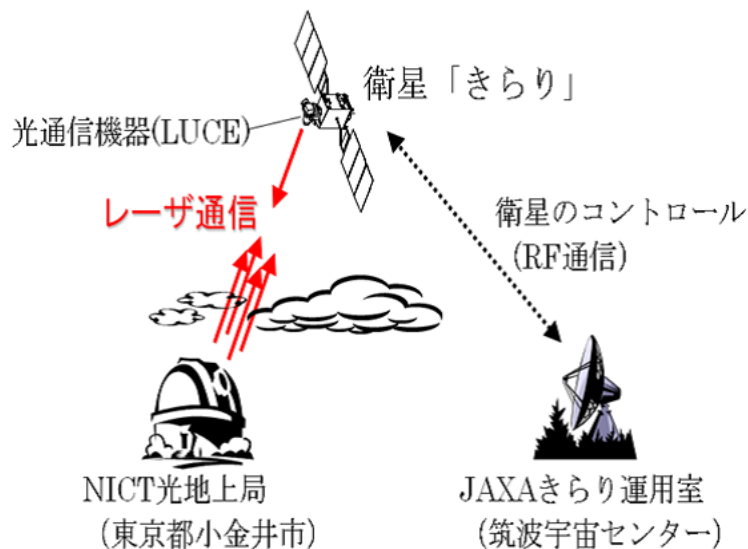


図 3.8: 地上一衛星間光通信実験の概要

2008年10月～2009年2月までの期間と2009年4月、8月の火曜日と木曜日の週2回、合計39回衛星との通信実験が行われた。実験時刻はおよそ深夜1時～3時の間で実施した。衛星の軌道により実験可能な時間変動する。今回実験で用いた OICETS は、低軌

道衛星であるため一回の実験に使える通信時間(可視時間)は5分ほどである。

3.2.1 光衛星間通信実験衛星システム

図3.9は、今回の衛星-地上間光通信実験において用いた OICETS の写真であり、ロケット打ち上げ時の音の衝撃に耐えられるかどうかの試験実施時に撮影されている。OICETS の仕様は、表 3.1 である。OICETS は 2005 年にカザフスタン共和国バイコヌール宇宙基地からドニエプルロケットを用いて打ち上げられた。地上から約 600km 付近の上空を飛行しており、地球 1 周を約 1 時半で周回している。

表 3.1: OICETS の仕様 [31]

打ち上げ日時	2005 年 8 月 24 日 6:10 (JST)
質量	約 570kg
大きさ	1.1m × 0.78m × 1.5m
軌道の種類	円軌道
軌道高度	約 610km
軌道傾斜角	約 98 度
軌道周期	約 98 分
制御方法	三軸姿勢制御方式

LUCE とは Laser Utilizing Communications Equipment を略したもので、OICETS の光通信を行う光衛星間通信機器であり、性能を表 3.2 に示す。LUCE は、1000km 離れた箇所を 5m のビーム径で照射できるように熱による歪みも考慮して設計、製作されている。20cm の光受信アンテナのミラーには、熱での変形を抑えるためにガラス製のものが使われている。また、衛星バス本体からの熱の影響を受けないように接続部においても熱での変形を抑える対応が取られている。光の波長が 847nm であるのは、OICETS のメインミッ



図 3.9: きらり (OICETS) (Copyright of JAXA)

ションが CNES の衛星である ARTEMIS との静止衛星—低軌道衛星間の光通信実験の実証であるため、相手方の ARTEMIS の仕様に合わせて 847nm の光源が選定されている。

表 3.2: LUCE の仕様 [31]

質量	140kg
アンテナ直径	26cm
波長帯	847nm
通信速度	49.3724Mbps
通信方式	NRZ
ビットエラーレート	10^{-6}

3.2.2 光地上局システム

今回の衛星—地上間光通信で用いた望遠鏡とその性能を図 3.10, 表 3.3 に示す。この望遠鏡は開口の直径が 1.5m 程あり、日本国内にある望遠鏡としては 4 番目の大きさである。この望遠鏡は、NICT では 1.5m 光望遠鏡と呼ばれており、衛星との光通信を行う際のアンテナであり、星を観測する通常の望遠鏡と比べて駆動速度が速い。今回の実験に用いた OICETS は低軌道衛星であり、周回速度はおよそ 7km/s のスピードである。そのため、低軌道衛星を追尾できる高い性能が求められ、1.5m 光望遠鏡は低軌道衛星を十分に追尾できる性能を保有している。

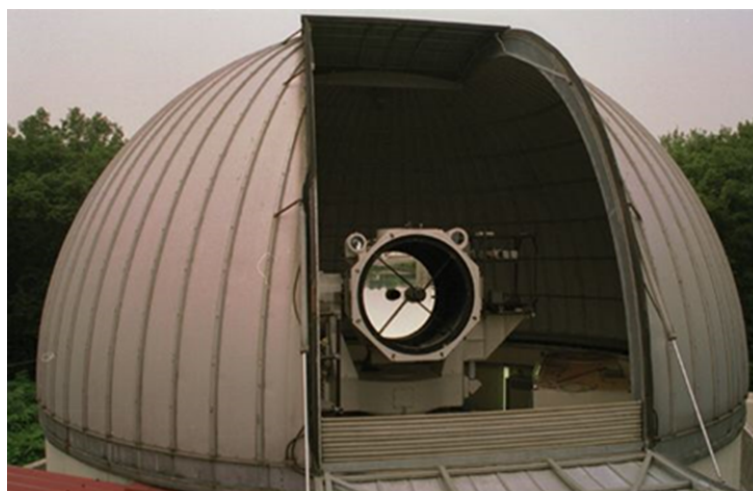


図 3.10: 1.5m 望遠鏡の外観

表 3.3: 1.5m 望遠鏡の仕様

開口の直径	1.5m
焦点距離	225cm
視野	0.7°
指向制度	1.37 rms
追尾制度	0.58 rms
最大移動速度	
方位角軸	$15^\circ / \text{s}$
仰角軸	$5^\circ / \text{s}$
分解能	0.36 rms

3.3 ファイバカップリング実験

3.3.1 精追尾機構の構成

本論文で用いた精追尾機構の駆動部とコントローラ制御部を図 3.11 と図 3.12 に示す。この精追尾機構の性能を表 3.4 に示す [66]。図 3.11 は、先頭にミラーがついており、黒い筒には piezo アクチュエータが x 軸に 2 本、y 軸に 2 本の計 4 本埋め込まれている。piezo アクチュエータ 4 本とも独立して動くことが可能で高速な動作に対応できる。精追尾機構は大気揺らぎによる通信品質の低下を改善し、受信した光をファイバまで導くため、大気揺らぎの変動にも対応できるように 6kHz で制御できるように設計されている。図 3.12 のコントローラ制御部は、下部が高圧電圧装置となっており、piezo アクチュエータに受光した光を供給している。真ん中の部分が微分回路装置で、上部が精追尾機構動作の ON/OFF 制御や制御感度を調整することを可能にする装置である。

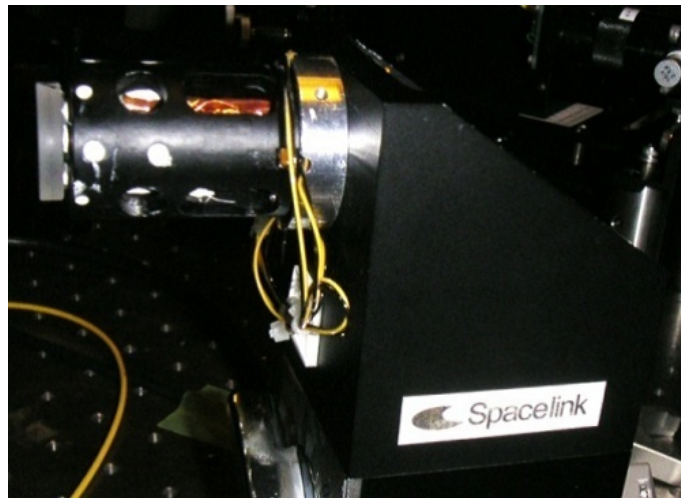


図 3.11: 精追尾機構の駆動部



図 3.12: 精追尾機構のコントローラ制御部

表 3.4: 精追尾機構の仕様 [66]

圧電素子	ピエゾアクチュエータ
駆動電圧	0-150V
総プリロード	900N
ミラー径	ϕ 20mm
可動範囲	± 2.7 mrad
分解能	$1 \mu rad$
周波数応答	DC ~ 6kHz

精追尾機構を用いた追尾方法について述べる。望遠鏡の主鏡で受けた光は、副鏡で縮小され、クーデパスを通り更にベンチの前のサブアパチャで全体の一部を切り取り光学ベンチまで受信光が導かれる。光学ベンチと精追尾機構の構成は図 3.13 のようになっており、受信光をビームスプリッタで分岐し、精追尾機構のミラーで光を反射する。精追尾機構と追尾センサ (quadrant detector, QD センサ) は閉ループが組まれており、追尾センサ

の中心に光が来るように追尾機構は制御されている。また、精追尾機構と追尾センサの間にビームスプリッタを置いて、その先にシングルモードファイバを置いている。ビームスプリッタ後の QD までの距離とシングルモードファイバまでの距離は同じにしており、集光させるために使用しているレンズは同一のものを設置している。また、追尾センサの中心に光が導かれるとシングルモードファイバに光が入るように調節してある。受信光のパワーは、2つのフォトダイオード (PD_a , PD_b) により測定した。 PD_a は、シングルモードファイバで受信したレーザ光を測定し、 PD_b は直接の受信光を計測している。光学系の損失は、実験前に測定し、ファイバカップリング効率を計算する際に参照データとして用いる。ファイバカップリング損失は、 PD_a で計測したシングルモードファイバでの受信電力と、 PD_b で直接計測した受信電力との差で求める。光学系による損失は、事前に計測を行い、予め取り除いてある。今回用いたシングルモードファイバと QD センサの前に置いてあるレンズは、ともに焦点距離が 10cm のものを用いた。

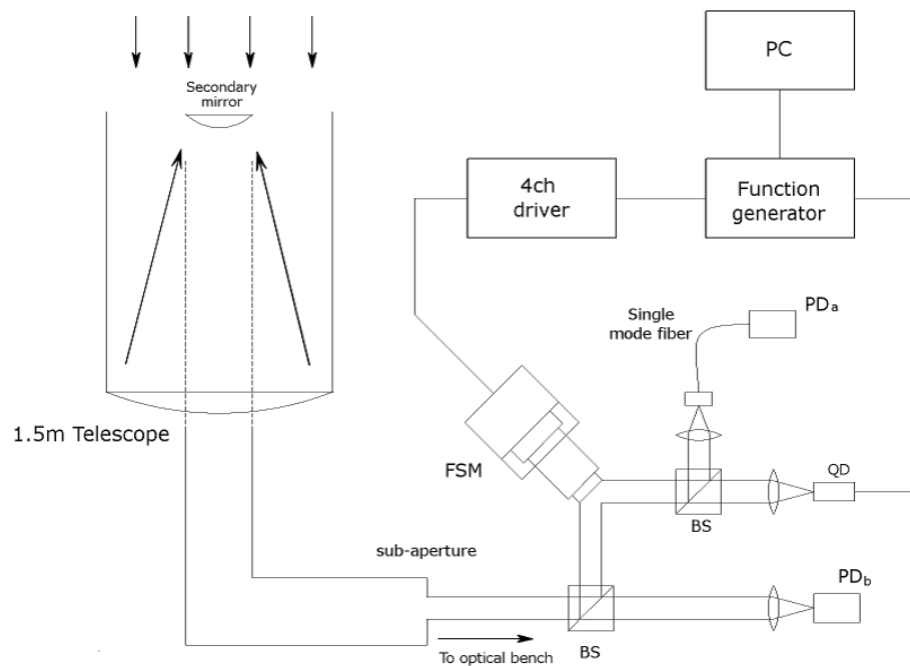


図 3.13: 精追尾機構の実験システム構成図

3.3.2 精追尾機構の QD センサの校正と基礎データの取得

QD センサの校正

精追尾機構の追尾誤差や到来角度変動のデータを得るには、エリアセンサである QD データの出力と精追尾機構のミラー角度との関係を確認する必要があり、計測と換算式の算出を行う。QD センサとは、図 3.14 のように光を受ける受光部が 4 つのエリアに別れており、受光面積の大きさに合わせて電圧が出力される。出力される $i_A \sim i_D$ の電圧のままでは使用するのに不便であるため、式 (3.10)、式 (3.11) を用いて算出される。この規格化された QD の x 軸と y 軸の出力（以下、規格化 QD 出力）を用いて算出している。

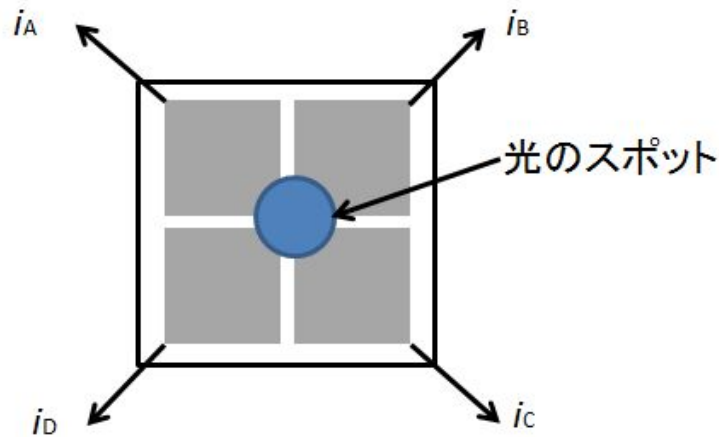


図 3.14: QD センサの構成図

$$Q_x = \frac{(i_A + i_D) - (i_B + i_C)}{i_A + i_B + i_C + i_D} \quad (3.10)$$

$$Q_y = \frac{(i_A + i_B) - (i_D + i_C)}{i_A + i_B + i_C + i_D} \quad (3.11)$$

精追尾機構の可動鏡を動作させたときの規格化 QD 出力の計測を行なった。条件として、精追尾機構の可動鏡と QD センサとの距離 (L_q) を 2000mm, 入射角度を 45 度とし、精追

尾機構の可動鏡の可動電圧を変化させて、QD センサ上を x 軸 9mm, y 軸 7mm 移動させた。精追尾機構の可動鏡を動作させたときの規格化 QD 出力の変化のグラフを図 3.15 と図 3.16 に示している。本章で使用している精追尾機構にはピエゾアクチュエータを用いており、ヒステリシスを持つため、電圧の上昇方向と下降方向の2回取得する。それにより、ピエゾアクチュエータの特性による誤差の発生を低減している。水平方向を x 軸、鉛直方向を y 軸とし、ピエゾドライバ入力電圧を V_f と表している。

グラフより、x 軸と y 軸の規格化 QD 出力と駆動電圧の関係は

$$QD_x = 14.96V_{fx} + 1.42, \quad (3.12)$$

$$QD_y = -9.46V_{fy} + 0.40, \quad (3.13)$$

となる。

次に、ピエゾドライバ入力電圧と可動鏡の振れ角の関係は、可動鏡が反射した光の移動距離を用いて計算すれば近似値を求めることが可能となり、光点の移動距離を計測した。光軸の変化は可動鏡の角度変化の2倍であるため、可動鏡の角度変換係数 F_a は、式 (3.14) となる

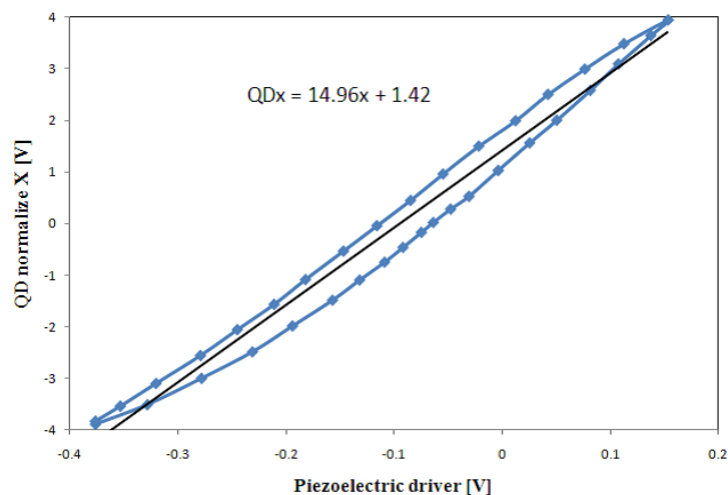


図 3.15: x 軸の規格化 QD 出力 QD_x とピエゾドライバ入力電圧の関係

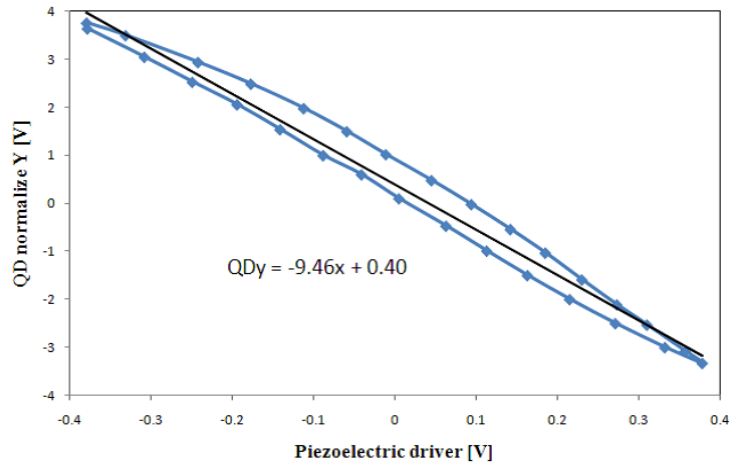


図 3.16: y 軸の規格化 QD 出力 QD_y とピエゾドライバ入力電圧の関係

$$F_a = \frac{Q_l}{2L_Q V_{fw}} \quad (3.14)$$

Q_l は QD センサ上の移動距離, L_Q は可動鏡と QD センサの距離, V_{fw} はピエゾドライバ入力電圧の可変幅である. そのため, 可動鏡の角度変換係数 F_a の x 軸, y 軸はそれぞれ, $F_{ax} = 2.96$, $F_{ay} = 2.30$ となる.

前述した式 3.12 と式 3.14 により, 可動鏡の角度変換係数と規格化 QD 出力の関係から光軸変量 L_O は光の入射角が 45° の場合, x 軸は 2 倍, y 軸は $\sqrt{2}$ 倍になる. このことから, 光軸振れ角と規格化出力 QD の関係は, 式 (3.15), 式 (3.16) となる.

$$Q_{rx} = \frac{2F_{ax}}{QD_x} \quad (3.15)$$

$$Q_{ry} = \frac{\sqrt{2}F_{ay}}{QD_y} \quad (3.16)$$

この装置と機材の配置では, 中心から 1V あたり X 軸方向に 0.361mrad, Y 軸方向には 0.359mrad の到来角度であることが推測できる. これでは, 精追尾機構からの電圧出力から角度変動や追尾誤差を算出できるようになる. ただし, この換算式は圧電素子であるピエ

ゾアクチュエータの特性を考慮する必要があるが、*QD* センサで光の入射角度を読み取ることにより、正確な角度が算出できる。

試験光源による精追尾機構の基礎データの測定

実際の衛星間光通信を行う前に、安定した光源を用いた場合の追尾機構の基礎データを計測した。図 3.17 に試験光源で得られた *QD* センサでの追尾誤差を示す。

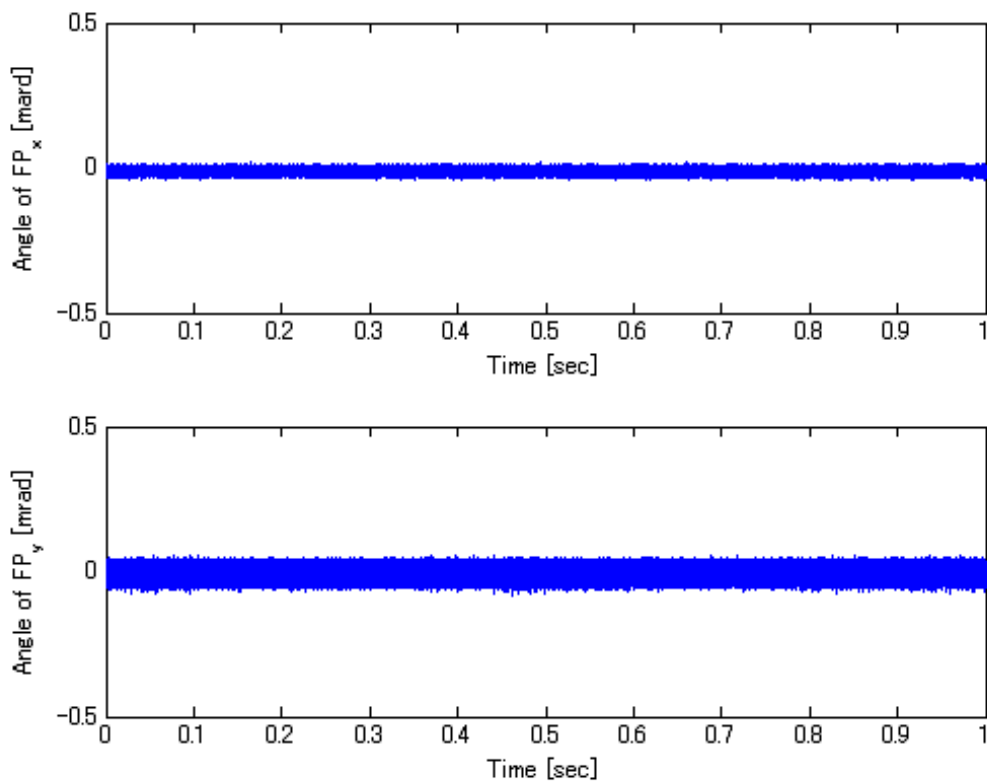


図 3.17: 試験光源での *QD* センサの追尾データ

計測値 v が N 個ある場合における 2 乗平方根は、式 (3.17) で求めることができる。

$$\sigma(v) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i)^2} \quad (3.17)$$

式 (3.17) を用いて, 計測した QD センサの追尾データを用いて x 軸と y 軸それぞれの σ を算出すると $\sigma_x = 0.088 \times 10^{-3}$, $\sigma_y = 0.2477 \times 10^{-3}$ となる.

さらに, 今回の実験で用いる装置の追尾誤差の範囲は, 式 (3.18)

$$\sigma_{rs} = f(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^{1/2} \quad (3.18)$$

となる. 今回実験で用いたレンズは焦点距離 f が 10cm であるため, 追尾誤差 σ_{rs} は $0.0276\mu m$ となる.

3.4 実験結果

3.4.1 実験期間と成功率

本論文で実施した実験結果の一覧を表 3.5 に, その詳細を表 3.6 に示している. 成功率が一番高かったのは 12 月で, 次は 1 月である. 基本的に冬の方が成功率が高いと考えている. この実験は, 深夜の 1 時~2 時の間に OICETS を用いて, 衛星-地上間光通信を合計 39 回行った. レーザは, 雲などの遮蔽物に弱いため, 雨が降ると実験が不可能になり中止となる. 曇りの日であっても雲の層が薄いと雲を突き抜けて通信が可能になる. ただし, 雲による伝搬損失が大きくなり通信品質も低下する. 晴れの日でも衛星回線の確立ができていないのは, 衛星機器の不具合やオペレーションミス, 機器の設定ミスなどによるものが含まれているためである.

表 3.5: OICETS 実験の月別実験結果 [36]

実験日時	実験回数	リンク確立回数	確立成功率 (%)
2008/10	5	2	40
2008/11	8	3	37.5
2008/12	8	7	87.5
2009/01	5	3	60
2009/02	3	0	0
2009/04	4	2	50
2009/05	2	0	0
2009/08	3	0	0
2009/09	1	0	0

表 3.6: OICETS 実験結果一覧 [36]

実験日時	実験回数	天気	確立有無	実験日時	実験回数	天気	確立有無
2008/10/16	1	晴れ	—	2008/12/25	21	晴れ	確立
2008/10/21	2	晴れ	確立	2009/01/08	22	雨	—
2008/10/23	3	曇り	—	2009/01/13	23	晴れ	確立
2008/10/28	4	曇り	確立	2009/01/15	24	晴れ	確立
2008/10/30	5	曇り	—	2009/01/20	25	曇り	確立
2008/11/04	6	晴れ	—	2009/01/29	26	曇り	—
2008/11/06	7	曇り	—	2009/02/10	27	晴れ	—
2008/11/11	8	曇り	—	2009/02/24	28	曇り	—
2008/11/13	9	晴れ	確立	2009/02/26	29	雨	—
2008/11/18	10	晴れ	確立	2009/04/16	30	雨	—
2008/11/20	11	晴れ	確立	2009/04/21	31	雨	—
2008/11/25	12	曇り	—	2009/04/23	32	晴れ	確立
2008/11/27	13	雨	—	2009/04/30	33	晴れ	確立
2008/12/02	14	晴れ	確立	2009/05/05	34	雨	—
2008/12/04	15	曇り	確立	2009/05/07	35	雨	—
2008/12/09	16	雨	—	2009/08/04	36	曇り	—
2008/12/11	17	晴れ	確立	2009/08/06	37	曇り	—
2008/12/16	18	曇り	確立	2009/08/11	38	曇り	—
2008/12/18	19	晴れ	確立	2009/09/09	39	晴れ	—
2008/12/23	20	晴れ	確立				

3.4.2 ファイバカップリングの測定結果

実験結果を図 3.18 に示す。図 3.18 の下のグラフは精追尾機構のサーボの ON - OFF を示しており、その時のシングルモードファイバを通してパワーメーターで受信された受信パワーが上のグラフである。実験中に意図的にサーボの ON - OFF を繰り返し行った。

サーボ回路は、0 V のときは OFF，5 V のときは ON するように設計されている。図 3.18 を見るとわかるように、サーボの電圧が 5 V になるとシングルモードファイバを通じた受信パワーが増加していることが分かる。サーボが 300～350 秒において ON - OFF が繰り返されている原因は、仰角が低くなり、受光量がサーボ回路の動作の閾値よりも低下することである。

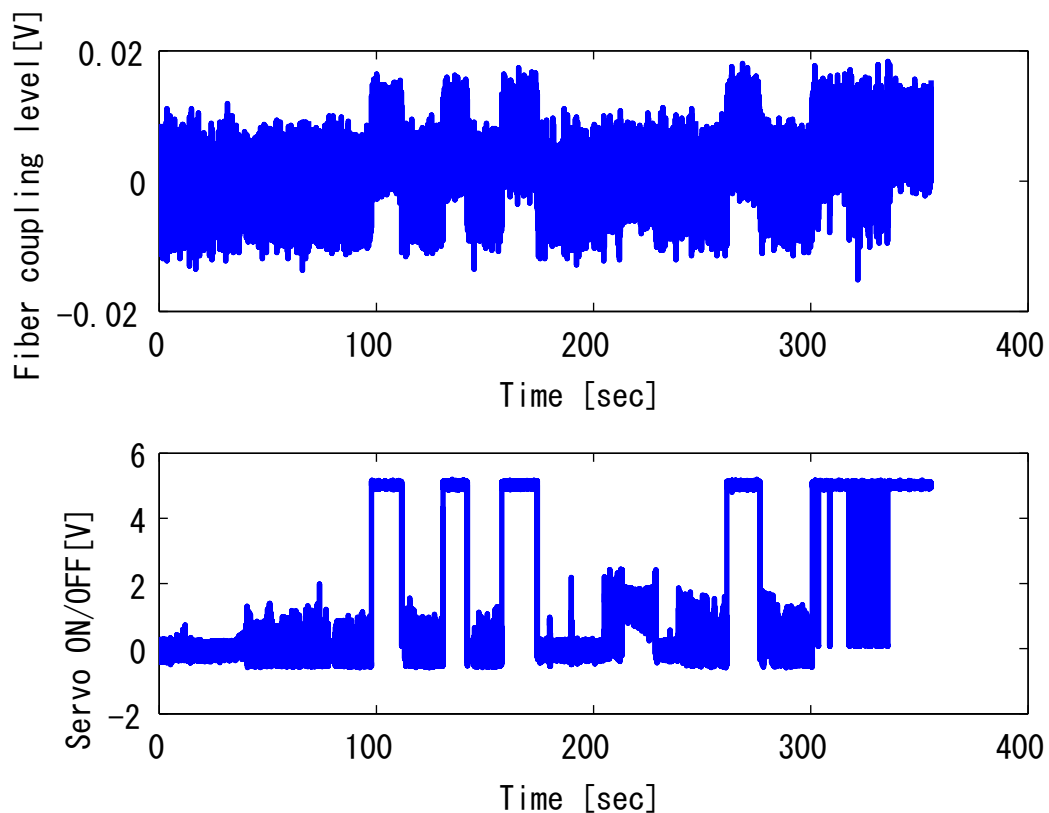


図 3.18: ファイバカップリングレベルとサーボ動作

図 3.19 には、精追尾機構が動作している 100~110 秒のファイバカップリング損失レベルについて解析した結果を示す。図 3.19 よりファイバカップリング損失は、おおよそ 11~18dB で推移していることが分かる。

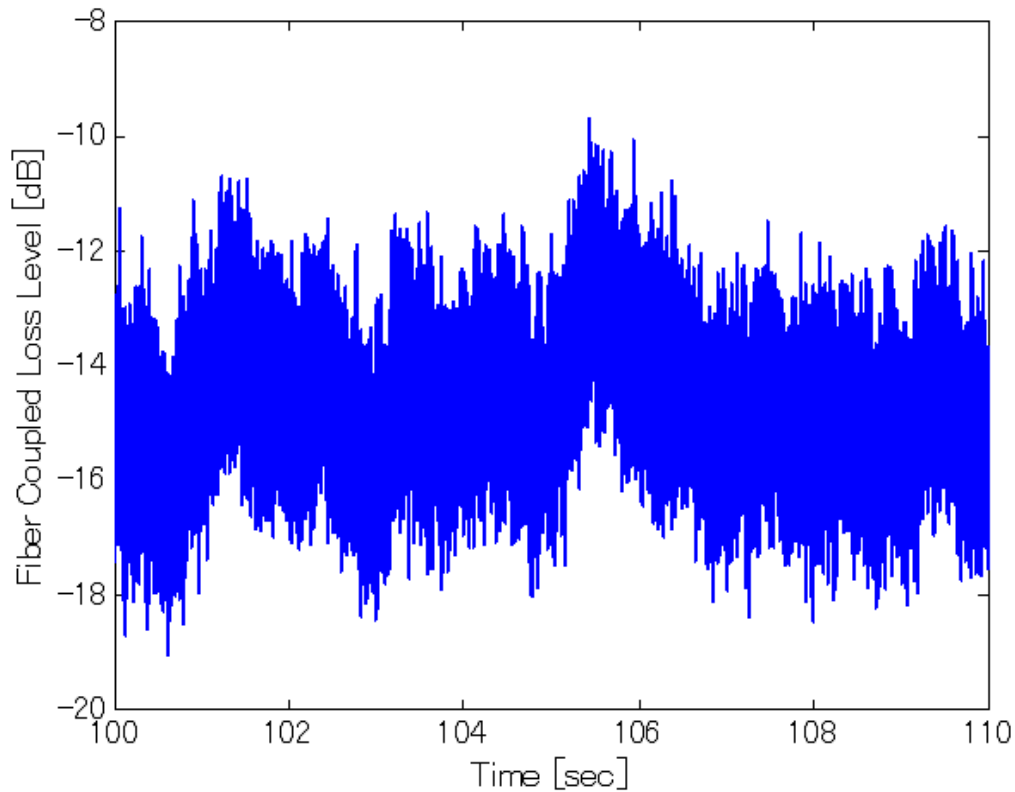


図 3.19: ファイバカップリング損失の時間変化

3.5 実験結果からの考察

3.5.1 実験結果と理論値との比較

衛星-地上間光通信実験で使用した装置のデータを用いて、大気揺らぎを考慮したファイバカップリング効率の理論式 (3.8) より、表 3.7 のパラメータで数値シミュレーションを行うとファイバカップリング損失は 17dB となる。図 3.19 に示したように実験結果のファ

イバカップリング損失が11~18dBで推移しているので、新たに提案した大気揺らぎを考慮したファイバカップリング効率の理論式を用いた数値シミュレーション結果は妥当であると考えられる。精追尾機構が動作中のシングルファイバへのカップリング効率の変動要因は、望遠鏡の追尾誤差、衛星の姿勢誤差・追尾誤差、風などによる大気揺らぎの変化したためと考えられる。

表 3.7: シミュレーションパラメータ

h_0	122 m
L	1000 km
A	$1.2 \times 10^{-13} m^{-2/3}$
W_m	5.2 μm
v	88 m/s
D_r	0.318 m
λ	847 nm
f	0.1 m
ζ	58 deg

3.5.2 周波数解析

前節と同様に精追尾機構が動作している100~110秒の追尾誤差のFFT解析を行い、その結果を図3.20に示している。また、精追尾機構が動作をOFFにしている時のパワースペクトル密度(PSD)の解析結果を図3.21に示す。

図3.20と図3.21を比較してみると、精追尾機構を動作させると低周波から高周波の各周波数スペクトルの変動が小さくなっていることが確認できる。特に低周波領域において変動が小さくなっており、低減効果が高くなっていることが確認できる。

ここで精追尾機構の動作時と非動作時において、どの程度精追尾機構における低減効果が発揮されているか検証する．実験中における精追尾機構動作時の追尾誤差 σ_{on} の値は、 $39.861 \mu m$ である．非動作時における精追尾誤差 σ_{off} は前節の式 (3.18) と同様に求めると $137.66 \mu m$ となる．

精追尾機構による低減効果率は、式 (3.19)

$$E_{fp} = \frac{\sigma_{on}}{\sigma_{off}} \quad (3.19)$$

となる．そのため、本論文で用いた精追尾機構は到来角度変動を 28.9% ほど追尾誤差を抑制できることが確認できた．

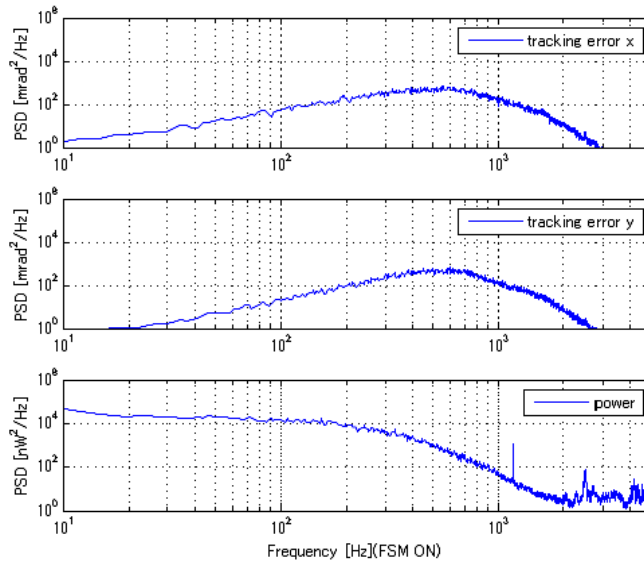


図 3.20: FFT の解析結果 (精追尾機構 ON 時)

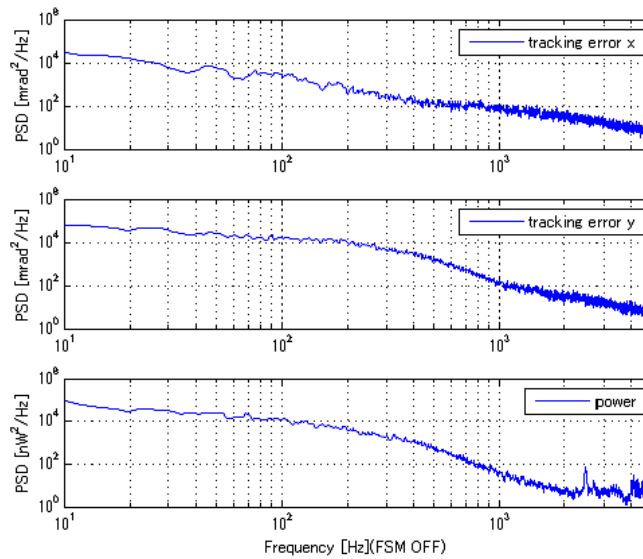


図 3.21: FFT の解析結果 (精追尾機構 OFF 時)

3.6 まとめ

この章では、水平伝搬における空間光通信のシングルモードファイバへのファイバカップリング効率のシミュレーションを実施した。大気揺らぎを考慮した地上-衛星間光通信に対応したファイバカップリング効率の提案を行い、シミュレーションを実施した。

水平伝搬における空間光通信のシングルモードファイバへのファイバカップリング効率の理論式と衛星-地上間光通信に対応したファイバカップリング効率の理論式の比較を行った。

今回のシミュレーションで用いたパラメータでは、強い大気揺らぎを仮定していたため、水平伝搬におけるファイバカップリング効率の通信距離が 1000m を超えた辺りで、水平伝搬における空間光通信のシングルモードファイバへのファイバカップリング効率の理論式では値がゼロに収束してしまう。衛星-地上間光通信に対応したファイバカップリング効率の理論式は、自然現象における高度が高くなると C_n^2 の値が小さくなることを表すことができているため、より実測に近い条件で算出することができる。

そして、シングルモードファイバへのファイバカップリング実験の内容とシステム構成について説明し、実験結果を示し、実験に対する考察を行った。実験では実際に低軌道上にある衛星を用いて、地上局に設置した精追尾機構により、大気揺らぎによる到来角度変動を28.9%抑え、なおかつシングルモードファイバに光を導くことが実証できた。実験結果より、精追尾機構動作時におけるファイバカップリング損失はおよそ11~18dBで推移していることを確認した。また、得られた実験データとシミュレーションデータを比較したところ、大気揺らぎを考慮したファイバカップリング効率の理論式を用いた数値シミュレーション結果は17dBの損失であった。そのため、実験結果から新たに提案した理論式は妥当であると判断している。また、精追尾機構が動作中のシングルファイバへのカップリング効率の変動要因は、望遠鏡の追尾誤差、衛星の姿勢誤差・追尾誤差や風による大気揺らぎの変化と考える。

第4章 符号化の適用

本章では、衛星-地上間光通信の通信品質改善方法の一つとして符号化の実装に関する検討を行い、ソフトウェアシミュレーションの結果を示している。はじめに、LDGM(Low-density generator matrix) 符号の有用性について検討を行い、ソフトウェアシミュレーションを用いて通信品質改善の効果性について検証した。なお、シミュレーションは、LDGM 符号について実施した。大気伝搬シミュレータは光衛星間通信実験衛星 (OICETS) を用いた光地上局実験から得た大気伝搬データに基づき作成されたものであり、より現実の通信環境に近い状態をシミュレーションできるようになっている。最後に、今回実施したソフトウェアシミュレーションの結果および今後の方向づけについて述べている。

4.1 衛星-地上間シミュレーション光通信における符号化の 検証

4.1.1 符号化の概要

符号化とは、収集した情報を一定の規則にしたがってデータ変換していく行為を指し、データの圧縮技術や暗号化、データの訂正技術などが含まれる。本論文では、光通信における誤り訂正技術についての符号化について述べる。日常的な通信を行なっている際にも、通信路や機器の影響で通信データに欠損が生じる場合がある。通信データに欠損を生じた時、誤りを訂正するために冗長データを付加したものを「誤り訂正符号」といい、誤りの検出を目的としたものを「誤り検出符号」という。これらの符号は誤り制御符号と呼

ばれている。誤り制御符号で誤りを検出後、Forward error correction(FEC)という付加された符号データを用いて訂正する手法とデータの誤りの検出のみに限定して、送信側に再送をリクエストする Automatic recovery quotient(ARQ) という手法の2種類の方法により、通信における通信データ訂正が行われる。伝送が悪い状況などでは、FECとARQの両方により訂正が行われる場合もある [55]。衛星-地上間光通信のように通信品質が安定しない場合は、アップリンクを正常に行うことが難しいため、今回はFECのみについて検証を行う。FECの符号としては、表4.1のようにRS符号やハミング符号、LDGM符号などがあり、日常的な通信から Compact Disc(CD) や Digital Versatile Disc(DVD) などのデジタル機器まで広い分野に使用されている [88]。

空間光通信の符号化の先行研究としては、アラモチ符号、ターボ符号、LDPC符号などの研究が行われている [71, 72, 76, 89]。アラモチ符号は送信装置を2機用いて、両方から符号化したデータをずらして送る方法である。この方法は、2方向から送信されるため片方の通信路を全く通らなかった場合でも、もう片方が通れば通信を行うことのできるため、大気揺らぎの影響を受けにくい。ただし、送信装置が2機必要なため、装置が大型化する傾向があり、ターボ符号やLDPC符号と比べると訂正能力も高くない。ターボ符号は、シャノン限界に近い高い訂正能力を発揮する符号化方法である。欠点としては、消失経路のような硬判定における訂正能力が出にくく、アルゴリズムが複雑で復号処理の負荷が高い。また、特許による使用制限があるため実装を行う場合には、注意をする必要がある。LDPC符号はターボ符号と同様、シャノン限界に近い高い訂正能力を発揮する符号化方法であり、符号長を任意に指定できる。ただし、符号長が短いと性能が出にくい。LDGM符号は、LDPC符号の一種であるため、同様の長所と短所を持ち、LDPC符号よりも早く符号化することができる。実際にLDPC符号とLDGM符号を比較した論文では、符号化の時間が約1000倍早くなる [75]。そのため、リソースの制限が厳しい衛星搭載に適した誤り訂正符号であると考えられる。

これまでの研究では、実際の衛星-地上衛星間光通信を用いての最適な符号パラメータや

インターリーブ長さ等のパラメータのチューニングについての研究報告は少ない [38,39,42]. そのため, 今後使われるであろう符号化について検証することは有意義なことである. 今回の検証では, 軌道上での計算時間の観点から, 衛星搭載に優れた符号であると考えられる LDGM 符号の性能を検証する.

表 4.1: 符号の種類と特徴 [71, 72, 75, 76, 89]

符号の種類	長所	短所
ハミング符号	実装が簡単	訂正能力が低い
アラモチ符号	符号化が簡単 通信路による影響を受けにくい	送信装置が2台必要
畳込み符号	ランダムエラーに強い	復号に時間がかかる バーストエラーに弱い
リードソロモン	誤り訂正能力が高い	復号に時間がかかる 符号長がガロア体に依存する
ターボ符号	誤り訂正能力が高い シャノン限界に近い符号化方法	特許による制限がある 実装が複雑 硬判定のとき性能が出にくい
LDPC 符号	誤り訂正能力が高い シャノン限界に近い符号化方法	ハードウェア実装が大規模になる 符号長が短いと性能が出にくい
LDGM 符号	誤り訂正能力が高い シャノン限界に近い符号化方法 符号化処理速度が速い	ハードウェア実装が大規模になる 符号長が短いと性能が出にくい

4.1.2 線形符号

線形符号における符号の生成方法について述べる．RS符号やLDPC符号なども線形符号であり，同じ特徴を持つ．線形符号では，パリティを生成するために用いる生成行列 \mathbf{G} と復号化に用いる検査行列 \mathbf{H} は式 (4.1) の関係がある [90]．

$$\mathbf{GH}^T = 0 \quad (4.1)$$

また，送信する情報シンボルの集合を \mathbf{x} とすると，パリティを含む符号語の集合 \mathbf{u} は，式 (4.2) で求めることができる．

$$\mathbf{u} = \mathbf{xG} \quad (4.2)$$

情報シンボルとパリティシンボルの位置を明確に区別することができる符号は，組織符号と呼ばれている [90]．組織符号の検査行列 \mathbf{H} は，式 (4.3) と表すことができる． \mathbf{P} は， $(N - K) \times K$ 行列で， \mathbf{I} は $(N - K)$ 次単位行列である．

$$\mathbf{H} = [\mathbf{P} \quad \mathbf{I}_{N-K}] \quad (4.3)$$

LDPC符号においては，一般的にまず，検査行列 \mathbf{H} を生成し，検査行列 \mathbf{H} から，符号化に必要な生成行列 \mathbf{G} を生成する．その後，生成行列 \mathbf{G} を用いて，符号語 \mathbf{u} を求める手法が取られている [74]．

4.1.3 LDGM符号

LDGM符号はLDPC符号の一種で，低密度行列を用いた誤り訂正符号である．LDGM符号は，符号化処理速度が速く，復号時に並列処理することが可能である．また，符号長を自由に設定することもできる [75]．

LDGM の符号長 N は、情報長を K , 列重み jn , 行重みを kn とした場合、式(4.4)で表される.

$$N = \frac{(jn + kn)K}{kn}. \quad (4.4)$$

LDGM 符号における検査行列 \mathbf{H} は、式(4.3)と同じ構成で詳細を示すと式(4.5)であり、大きさは $N \times K$ 行列となる. 行列 \mathbf{P} は、非零成分が少ない低密度な行列であり、その中の非零成分である個数は、列重み jn , 行重みを kn で与えられる. LDGM 符号の検査行列 \mathbf{H} の一例を示すと、図4.1になる.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{P} & \mathbf{I}_{N-K} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & \cdots & m_{1,K} & p_{1,1} & 0 & \cdots & 0 \\ m_{2,1} & m_{2,2} & & \vdots & 0 & p_{2,2} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots & & \ddots & 0 \\ m_{K,1} & \cdots & \cdots & m_{K,K} & 0 & \cdots & 0 & p_{N-K,K} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

この検査行列要素の相関を表す2部グラフは図4.2となる. 図4.2の青ノードは、検査行列の行ベクトル $(m_{i,1}, \dots, m_{i,K})$ に、橙ノードは検査行列の行ベクトル $(p_{i,1}, \dots, p_{i,N-K})$ に対応している. また、黄のチェックノードは検査行列の各行ベクトル $(c_1 - c_K)$ に対応している. 検査行列とチェックノードの関係は、図4.2の様に相関しており、総和が0になるように設定されている. チェックノード c_1 においては、式(4.6)が成立する.

$$m_{1,2} + m_{1,3} + m_{1,4} + p_{1,1} = 0 \quad (4.6)$$

式(4.6)から、パリティ p_1 を求めることができる. 全てのチェックノードに対して、パリティを求めることで、符号化を行うことができる. このように、LDGM 符号は生成行列を生成せずに符号化を行うため、符号化処理を速く行うことができる.

例として、送信する情報シンボルの集合を \mathbf{x} $(1, 0, 1, 1, 0)$ とし、使用する検査行列 \mathbf{H} を図4.1とすると、得られる符号化したシンボルの集合 \mathbf{u} は、 $\mathbf{u}(1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 1)$

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cccc}
 (m_1 & m_2 & \dots & m_K) \\
 \leftarrow & \leftarrow & \leftarrow & \leftarrow \\
 & \text{K} & & \\
 \leftarrow & \leftarrow & \leftarrow & \leftarrow \\
 & \text{N-K} & & \\
 \rightarrow & \rightarrow & \rightarrow & \rightarrow \\
 \end{array} \\
 \\
 H = \begin{pmatrix}
 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{pmatrix} \begin{array}{l} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ c_K \end{array} \\
 \begin{array}{c}
 \text{kn} \\
 \text{jn}
 \end{array}
 \end{array}$$

図 4.1: LDGM 符号検査行列の例 ($jn = kn = 3$)

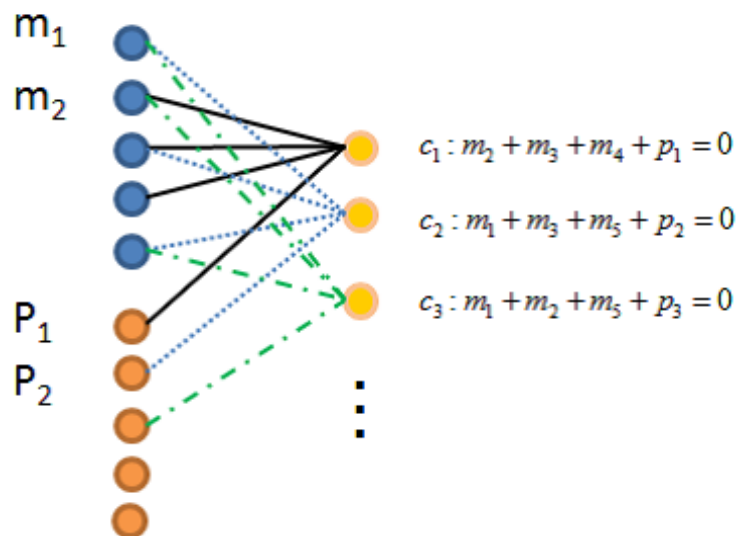


図 4.2: LDGM 符号の 2 部グラフの例

となる。

復号を行うには、繰り返し復号法 (sum-product) がよく用いられる [91]。消失通信路における復号化の手順としては、まずチェックノードの計算を行い、非零であるチェックノードを探す。消失通信路とは、通信路を通過した後の受信側で通信データのエラー箇所を知ることができるが、エラー箇所の受信データ内容が分からないという条件の通信路である。非零であるチェックノード内に含まれる消失シンボルが一つである場合、チェックノードの式から総和を求めて消失シンボルの訂正を行うことができる。複数の消失信号が含まれている場合は、訂正ができないが、他の消失シンボルの訂正が行われることで、チェックノード内の消失シンボルが減り一つになることがあるため、繰り返しチェックノードの計算を行う。訂正とチェックノードの計算を繰り返し行い、エラーが無くなるか、各チェックノード内の消失シンボルが一つであるものが無くなると終了する。

符号の訂正能力を測る指標として、最小距離がある。最小距離を求めるには、すべての組み合わせにおける符号間の距離を計算する必要があり、符号長が長くなると計算量が膨大になる。そのため、LDGM 符号は、直接、最小距離を求めるのではなく、シミュレーションの結果から最小距離を推定して求める。

4.2 ソフトウェアシミュレーションの実施

4.2.1 シミュレーション構成

シミュレーション条件として、消失通信路を仮定してシミュレーションを実施する。エラー箇所を判別するために、今回のシミュレーションでは、図 4.3 のように生成したデータをパケット化している。消失通信路を選択する理由は、LDPC/LDGM 符号において、センサから取得した 1 次データを用いた復号方法が提案されているが、これは 100Gbps 等の高速化した場合、1 次データを取得するための A/D 変換がボトルネックになると考えており、パケット化における消失通信路の方が実装におけるハードウェア要求が少ないから

である。

ソフトウェアシミュレーション構成として、Additive white Gaussian noise (AWGN) のランダム消失シミュレーションと、大気揺らぎモデルを用いたバーストエラーでの通信シミュレーションの2種類を行う。

なお、符号化の方式については、符号化時間が早くて、今後の衛星-地上間光通信の高速通信に耐えうると考えられる LDGM 符号でシミュレーションを実施した。シミュレーションでの通信速度を 1Mbps に設定し、復号化方法は、sum-product 復号法を用いた。

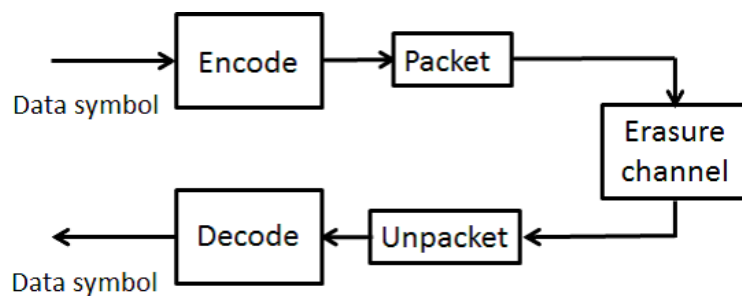


図 4.3: シミュレーション構成図

シミュレーションの手順としては、まず送信するビットデータからシンボルに変換してエンコードを行い符号化を施す、そして通信路を通してノイズを与え信号を劣化・消失させている。その後受信側で劣化した信号を符号化によって訂正を行い、シンボルからビットデータに変換している。この受信側で取得したビットデータと送信したビットデータとを比較してエラー量を計測している。

LDGM 符号の符号パラメータを表 4.2 に示す。符号のパラメータと通信速度は、NICT で開発をした SOTA(Small Optical Transponder) の機能制限から決定している。

4.2.2 SOTA

SOTA とは、Small Optical Transponder の略で超小型衛星に搭載するために開発された [93]。また、SOTA は、SOCRATES に搭載され 2014 年 5 月に打ち上げられた [94]。

表 4.2: LDGM 符号パラメータ [92]

符号方式	LDGM
ガロア体	2^4
符号長 N	1000 (シンボル)
重み (jn, kn)	(7,7)
符号化率	0.5

SOTA は、4つのレーザを搭載している。その内訳を表 4.3 に示す。SOTA は、TX1, TX4 の2つの通信用レーザと TX2, TX3 のパルスレーザの計4つのレーザを搭載している。また、受信機能も持っており、通信速度は1Mbps と 10Mbps の2種類から選ぶことが可能である。他にも誤り訂正符号の機能も持っており、RS 符号と LDGM 符号を適用させることが可能である。

表 4.3: SOTA 送受信機能 [93]

Wavelength	TX1	980	nm
	TX2 & 3	800 帯	nm
	TX4	1550	nm
	RX	1064	nm
Data rate		1 / 10	Mbps
RX antenna diameter		5	cm
Error correction		RS / LDGM	

4.2.3 大気揺らぎを考慮した通信路

大気揺らぎシミュレーション

大気揺らぎシミュレーションとは、実験室内において、空間伝搬した場合の空間光通信の受信強度をシミュレーションすることである。衛星-地上間光通信において、受信強度を把握し、安定した通信品質を確保することは、解決すべき重要な課題の一つである。大気揺らぎによる影響は、通信距離や大気の種類、風速などによって大きく変化する。そのため、様々な条件下でシミュレーションを行うことは、大変有用な試みである。また、大気揺らぎによる発生する通信エラーは、バーストエラーが支配的なエラーになる。この大気揺らぎシミュレーションは、実際に収集したデータを用いての衛星-地上間光通信に関する実験を行うことを可能にする。宇宙光通信を実際の衛星を使用して実験を行うことは、莫大な費用と時間を必要とする。そのため、大気揺らぎシミュレーションで行うことは大変有益で効果性も高いと考える。

適用理論モデル

大気揺らぎをシミュレーションするにあたり、大気揺らぎのパワースペクトルを求める必要がある。大気揺らぎのパワースペクトルは Von Karman スペクトル式 4.7 を用いる [82].

$$W_s^2(\kappa) = \frac{0.033C_n^2 \exp(-\kappa^2/\kappa_m^2)}{(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{11/6}} \quad (4.7)$$

また、 $\kappa_m = 5.92/l_0$ 、 $\kappa_0 = 2\pi/L_0$ である。 l_0 は、最小のスペックルのスケールを表しており、 L_0 は最大のスペックルのケースである。そのため、シミュレーションによるスペックルサイズは、この l_0 と L_0 の範囲内で発生する。シミュレーションで用いる、大気の種類関数は、2章で述べた Hufnagel-Vally モデルの式 (2.8) を用いる。

$$v = \left[\frac{1}{15 \times 10^3} \int_{5 \times 10^3}^{20 \times 10^3} V_B^2(h) dh \right]^{1/2} \quad (4.8)$$

また, $V_B(h)$ は式 (4.9) となる.

$$V_B(h) = \omega_g h + v_g + 30 \exp\left(-\frac{h - 9400}{4800}\right) \quad (4.9)$$

式 (4.9) において, v_g は地上における風速であり, ω_g は, ビームのスルーレートである. このスルーレートは, 衛星からのレーザを地上で受信する際の望遠鏡の角速度で決まる.

大気揺らぎシミュレーションによりシンチレーションである強度の変化を測定するためには, 時間軸に対するパワースペクトルを求める必要がある. 時間軸のパワースペクトル $W_s^2(\kappa)$ を求めるには, 式 (4.10) を用いる [79].

$$\omega_c^2(f) = \frac{0.033 C_n^2 T_r^2 D^2}{4V^2} \int_0^\infty \frac{J_1^2(\pi D \sqrt{\kappa^2 + f^2/V^2})}{(\kappa^2 + f^2/V^2)} \times \frac{\exp[-(\kappa^2 + f^2/V^2)/\kappa_m^2]}{(\kappa^2 + f^2/V^2 + \kappa_0^2)^{11/6}} \quad (4.10)$$

今回のシミュレーションでは, 衛星-地上間光通信における符号化の効果を検証するため, 大気揺らぎモデルに用いる数値は, 3章で示した OICETS 実験で得られたパラメータを用いて行なっている. 式 (4.10) を用いて, $D = 0.05m$, $V = 80m/s$ で数値計算を行う.

波形の生成手順は, まず, 各パラメータから周波数スペクトルを生成する. 生成した周波数スペクトルからフィルタリングを行い, 大気揺らぎとは関係ない周波数成分を除去する. フィルタリングした周波数スペクトルに対してランダムな位相を付加したデータを生成する. 最後にランダムな位相を付加した周波数スペクトルから, 逆フーリエ変換することで時系列のデータを生成している. 生成した時系列のデータは, 図 4.5 になる. 更に, 生成した時系列データを FFT 解析をした結果は, 図 4.4 となる.

図 4.4 の周波数スペクトルの特徴をみると, 500Hz あたりから周波数成分がなだらかに低下している. 図 4.6 に OICETS 実験で取得したデータの FFT 解析結果を示す. 図 4.4 と

図 4.6 を比較しても似たような周波数成分を表現出来ている．この大気モデルを用いて衛星-地上間光通信における符号化の効果の検証結果を次の節に示す．

この大気揺らぎの時系列データは，通信速度との時間軸が合わないため，符号シミュレーションを行う前に時間軸が合うように線形補完を行う．今回の符号シミュレーションでは，bit ごとに波形生成したシミュレーションまでは行っておらず，シンボルごとにたいする大気揺らぎの影響を調べて符号シミュレーションを実施している．また，符号シミュレーションでは，閾値を変化させてパケットエラー率を変化させているが，大気揺らぎモデルの場合パケットエラー率の推測が難しいため，閾値を変化させた時にどのようなパケットエラーになるか，符号シミュレーションを行う前に予め調査している．

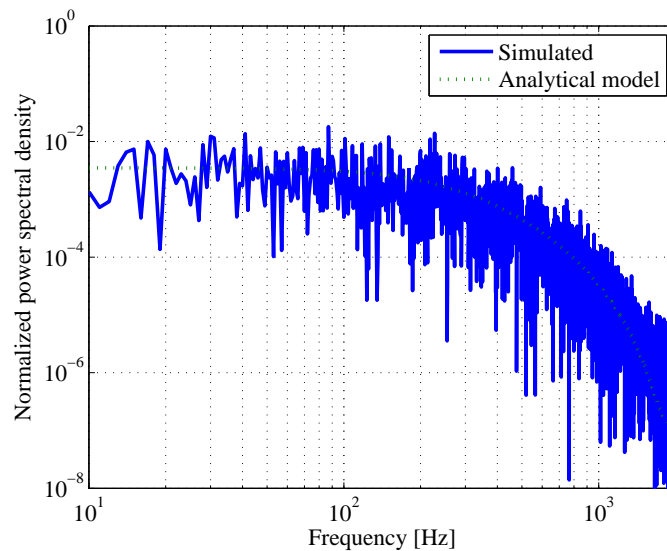


図 4.4: 大気揺らぎモデルの周波数スペクトル

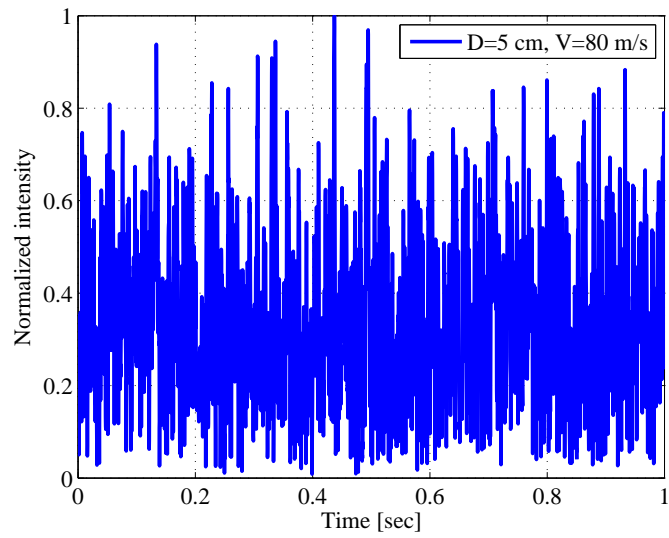


図 4.5: 大気揺らぎモデルを用いて生成した強度変動

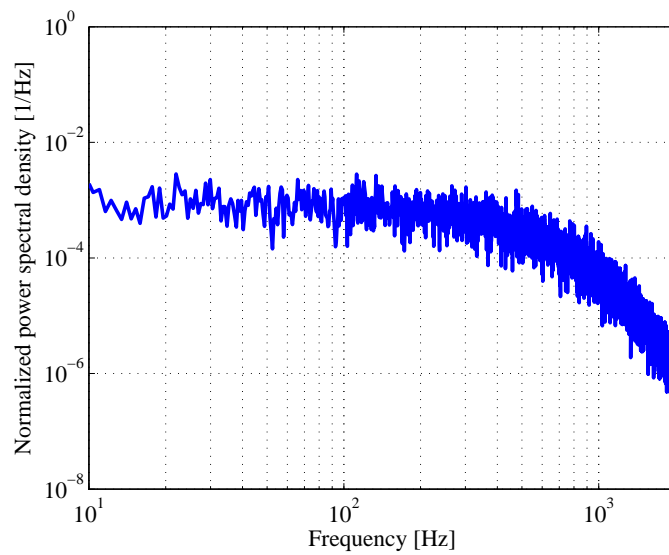


図 4.6: OICETS 実験で取得した受信強度の FFT 解析結果

4.2.4 シミュレーション結果

LDGMでのランダム消失通信路のLDGM符号のシミュレーション結果を図4.7に示す。ランダム消失において、LDGM符号はPERが 10^{-2} で、40%ほどの消失訂正能力がある。今回用いたLDGM符号パラメータの最小距離 d_{min} をシミュレーション結果から推定する。訂正能力が40%とすると、情報長 $K = 500$ から最小距離 d_{min} は200であることが推定できる。

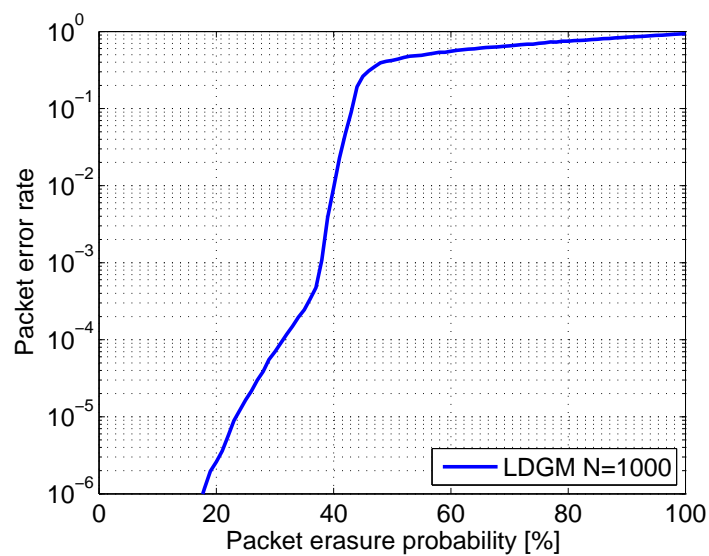


図 4.7: ランダム消失通信路のLDGM符号のパケットエラーレート

次に、LDGM符号における大気揺らぎ関数から生成したバースト通信において、シミュレーションを行った結果を図4.8に示している。LDGMの符号では、符号長が長いため、バーストエラーによって訂正能力が無くなることは無いが、ランダム通信路に比べて、訂正能力が約5%まで大きく低下しすることが確認できた。大気揺らぎ通信路における訂正能力を向上させるためには、インターリーブを検討する必要がある。

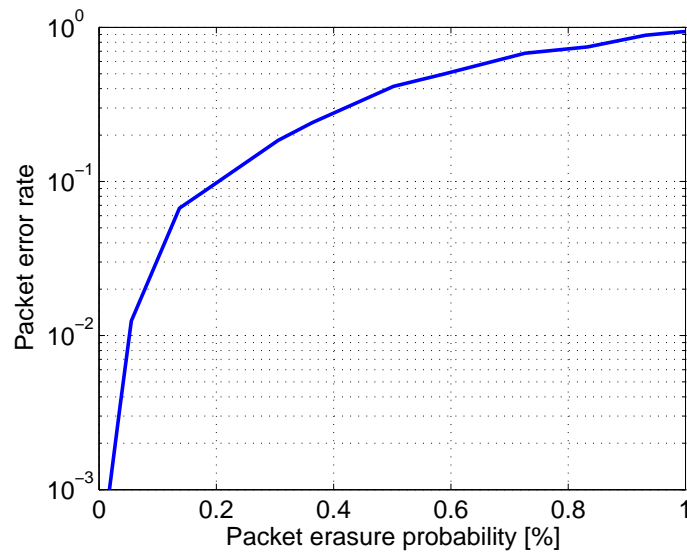


図 4.8: 大気揺らぎを考慮した通信路における LDGM 符号のパケットエラーレート

4.3 インターリーブの検討

バーストエラーをランダムエラーに分散させるために、インターリーブの検討を行う。インターリーブとは、送信側で送信データのある法則に沿って順序を並び替えてから送信を行い、受信側ではその法則に沿って順序を並び替え元の順序に戻すことである。これによって、バーストエラー発生時にエラー箇所が分散され、バーストエラーからランダムエラーに近いエラー分散になるため、符号の訂正能力が上がることを期待できる。図 4.9 にブロックインターリーブの方法を示す。データ書き込み方向に生成した符号データを順番に埋めていく、この時の長さは符号長により決まる。必要なデータ数を積み上げて連結させて、データを一時的に貯めておく。そして、横に詰めていたデータを縦に読み込んで行くことでバーストエラーが起きた際のデータの消失を分散化することができる。

バースト長を考慮する場合、符号長を N 、ブロックサイズを $b(\text{bit})$ 、インターリーブの深さを J_l とした時、得られるバーストエラー量 L_c は、式 (4.11) となる。



図 4.9: インターリーブの方法

$$L_c = b J_l \tag{4.11}$$

例えば、通信速度 1Mbps で大気揺らぎの 1kHz 変動を耐えられるようにするには、最低でも 1000bit のインターリーブが必要になることが、式 (4.11) から算出できる。そのため、先ほどの検証で用いた LDGM 符号パラメータを用いて計算を行うと 1 シンボルが 4bit であるため、250 ほどインターリーブの深さが必要になる。

インターリーブを適用することにより、どのようにバーストエラーが分散するかを確認する。図 4.10 はインターリーブを適用する前のシンボルエラーの傾向を示している。この分布は、消失確率が 30 % ほどの場合である。消失確率が上昇すれば、バーストエラー量も増えるが、逆に下がればバーストエラー量も減る傾向がある。今回の LDGM 符号のパラメータは、消失確率が 30~40 % で効果を発揮するため、消失確率 30 % で効果を確認する。図 4.10 の上のグラフは、一つ繋がった通信を 1000 シンボルごとに折り返した図になっており、黒点がシンボルエラーを示している。横に伸びる黒線がシンボルエラーが連続に発生した箇所でありバーストエラーであることを示している。図 4.10 の下の図は、上の図で示したバーストエラーの分布を示している。今回の符号パラメータは、ガロア体を $GF(2^4)$ としているため、表示されている一つの点あたり長さは 4bit となる。そのため、

通信速度が 1Mbps の場合，250 シンボルの消失で 1ms のバーストエラーとなる．

図 4.10 のバーストエラー量を見ると，250 以下のバーストエラーが 75 %以上占めている．また，長いバーストエラーでは，4ms ほど続く場合も存在している．

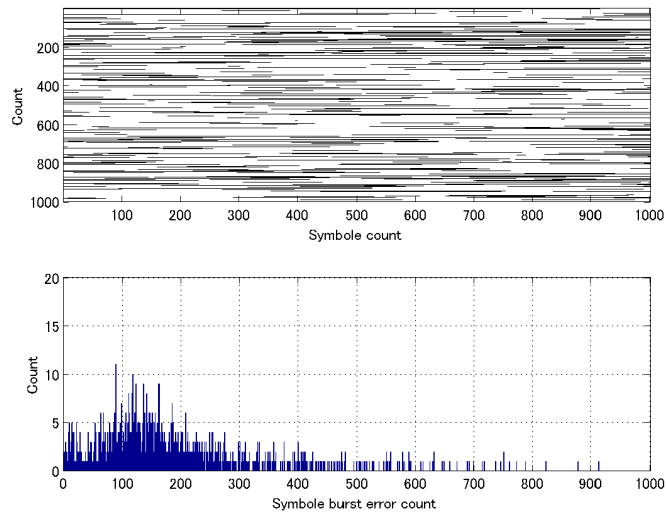


図 4.10: インタリーブ適用前のエラー傾向

次に，図 4.10 にインタリーブの深さ 200 を適用した結果を図 4.11 に示す．インタリーブを適用することにより，バーストエラーが分散され，ランダムエラーのようにエラー箇所が分散されることが確認できた．また，インタリーブ深さを 500 まで長くすると，図 4.12 のように，インタリーブ深さ 200 でほとんど無くなっていたバーストエラーが増加している．これは，バーストエラーの周期とインタリーブによる周期が重なりあった場合に起こる．そのため，通信路のエラー傾向に合わせてインタリーブ深さを決める必要がある．

インタリーブを適用したデータに対して誤り訂正符号が，どの程度の変化をするかシミュレーションを行う．インタリーブの深さ J_l 以外は，先ほどと同じ符号パラメータを用いる．インタリーブを用いた場合のシミュレーション結果を図 4.13 に示す．

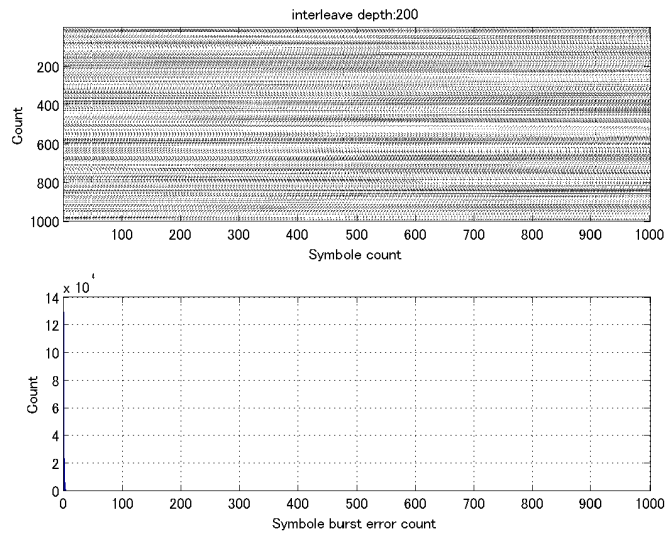


図 4.11: インタリーブ適用後のエラー傾向 ($J_l = 200$)

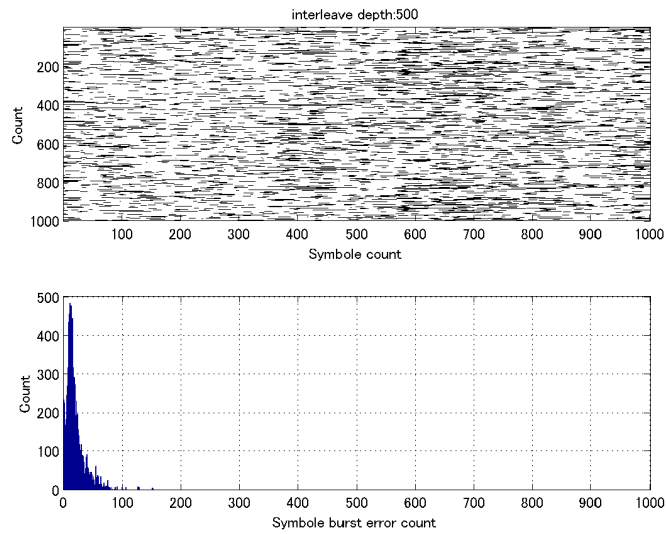


図 4.12: インタリーブ適用後のエラー傾向 ($J_l = 500$)

LDGM 符号は、インタリーブを適応しない大気揺らぎ通信路の場合、訂正能力が約 5%程度まで低下したが、パケットエラーレートが 10^{-2} でインタリーブの深さ J_l が 100 のとき、約 38%になり、インタリーブの深さ J_l が 250 の時、約 40%になりランダム通信路と変わらない訂正能力を得ることができる。今回用いた大気揺らぎ伝搬モデルにおい

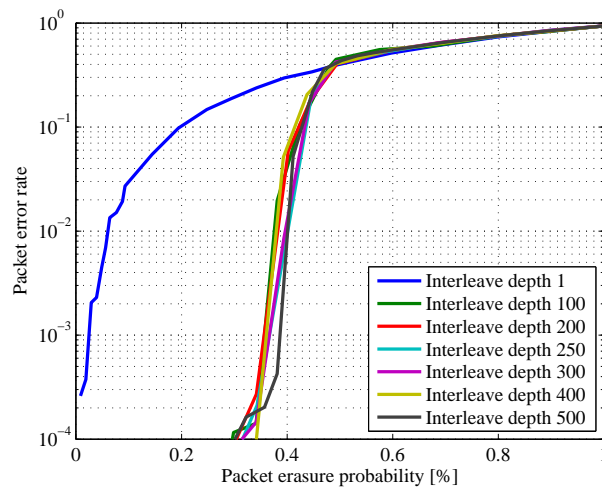


図 4.13: インターリーブを適応した大気揺らぎ通信路における LDGM 符号のパケットエラーレート

では、ブロックインターリーブの深さを 250 にすれば大気揺らぎに起因するパースト誤りの訂正に効果を発揮することが確認できた。また、検証で用いた通信速度は 1Mbps と低速であったが、今回得られたブロックインターリーブの時間は、大気揺らぎに対する結果であるため、通信速度が数十 Gbps になっても大気揺らぎによって発生する影響は同じであると考えられるため、同様にインターリーブによる通信品質の向上が得られると考えている。

4.4 符号化利得の計算

4.4.1 符号誤り率

符号誤り率 (BER) は、0 と 1 からなるデータを受信するときに、伝送データが 0 であるのに受信側で誤って 1 と判別する確率と伝送データが 1 であるのに受信側で誤って 0 と判別する確率を合わせた値である [96]。

通信時における信号レベルの分布を図 4.14 に示す。強度変調通信における Low レベル

を s_0 , High レベルを s_1 とし, s_0 における分散を σ_0^2 , s_1 における分散を σ_1^2 とする. また, Low レベル, High レベルと判別する際に用いる閾値を V_{th} とする. 光通信においては, IM-DD 方式, on-off-keying(OOK) の場合, s_0 は受信光がなく 0 と判別される場合であり, s_1 は受信光があり 1 と判別される場合を示している. そのため, σ_0 は, 受信光がない場合のノイズの標準偏差であり, σ_1 は, 受信光から得られた信号とノイズの標準偏差が合成されている.

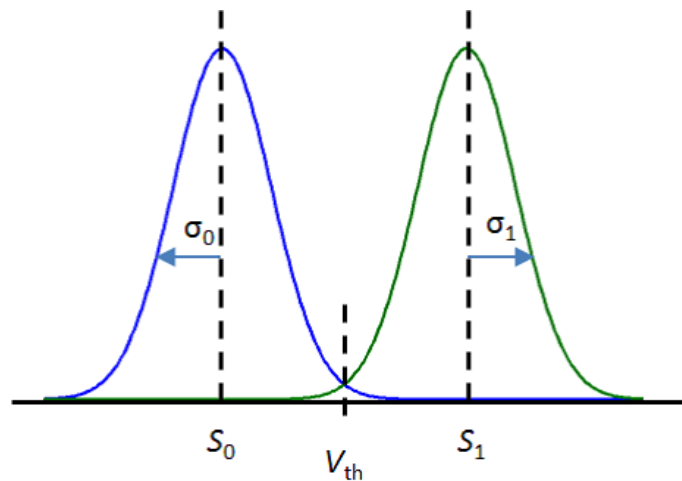


図 4.14: 信号レベルの分布

信号を誤認識する確率 $Pr(E)$ は, 式 (4.12) と表すことができる. $P(0)$ は, Low レベルの発生確率を示しており, $P(1)$ は, High レベルの発生確率を示している. E_{01} は, Low レベルを High レベルと誤認識する確率を示しており, E_{10} は, High レベルを Low レベルと誤認識する確率を示している.

$$Pr(E) = P(0)E_{01} + P(1)E_{10} \quad (4.12)$$

信号レベルの分布が同じガウス分布であると仮定すると, $Pr(E)$ は式 (4.13) となる.

$$Pr(E) = \frac{1}{2\sqrt{2\sigma_0^2}} \int_{V_{th}}^{\infty} \exp\left\{-\frac{(\nu - s_0)^2}{2\sigma_0^2}\right\} d\nu + \frac{1}{2\sqrt{2\sigma_1^2}} \int_{-\infty}^{V_{th}} \exp\left\{-\frac{(\nu - s_1)^2}{2\sigma_1^2}\right\} d\nu \quad (4.13)$$

更に, Low レベルと High レベルの信号確率が共に $1/2$ とした場合, 閾値 V_{th} が, s_0 と s_1 のガウス分布の交点 (Q) とすると $E_{01} = E_{10}$ となる. Q と V_{th} の関係は, 式 (4.14) と式 (4.15) から, 式 (4.16) となる. また, OOK において, s_0 は無信号であることが Low レベルと判別する条件であるため, s_0 は 0 となる.

$$Q = \frac{V_{th} - s_0}{\sigma_0} = \frac{s_1 - V_{th}}{\sigma_1} \quad (4.14)$$

$$V_{th} = \frac{\sigma_0 s_0 + \sigma_1 s_1}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (4.15)$$

$$Q = \frac{s_1 - s_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{s_1}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{s_1}{2\sigma_1} \quad (4.16)$$

また, $(s_0 - \nu)/\sigma_0 = u$, $(s_1 - \nu)/\sigma_1 = u$ と置換え, 式 (4.13) をまとめると, 式 (4.17) となる.

$$Pr(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_Q^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (4.17)$$

相補誤差関数である式 (4.18) を用いると, 式 (4.19) と置き換えることができる [95, 96].

$$erfc(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \quad (4.18)$$

$$Pr(E) = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (4.19)$$

光通信の強度変調における雑音量を信号 (s_n) における雑音 (σ_n) の平均値の 2 乗であると仮定すると信号対雑音比 (signal-to-noise ratio, SNR) は, 式 (4.20) と表すことができる [96].

$$SNR = \frac{s_n^2}{\sigma_n^2} = \left\{ \frac{s_1 - s_0}{(\sigma_1 + \sigma_0)/2} \right\}^2 = 4Q^2 \quad (4.20)$$

SNR を式(4.19)に適用させると、光通信の強度変調における $Pr(E)$ と SNR の関係は、式(4.21)と表すことができる。この $Pr(E)$ を BER と仮定して利得の算出を行う。空間光通信においては、大気揺らぎによって SNR が劣化することが知られているが、今回のシミュレーションでは、大気揺らぎによる SNR の劣化は生じないものとして算出を行う [87]。

$$Pr(E) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{SNR}}{2\sqrt{2}}\right) \quad (4.21)$$

4.4.2 シミュレーション条件

今回のシミュレーションでは、OOK 方式による LDGM 符号を適用させた場合と誤り訂正符号が適用しない場合との比較を行い、LDGM 符号により、符号化利得がどのように得られるかシミュレーションを実施する。消失通信路における符号化利得を算出するために、幾つか条件を設定する。

今回の通信方式は、IM-DD 方式、OOK とする。OOK における BER と SNR の関係は、式(4.21)により求めることができる。今回のシミュレーションは、前述のシミュレーションと同様に消失通信路としてシミュレーションを実施した。消失通信路を適用させるために、パケット化を行ない、消失位置を検出する。シミュレーションに用いるパケットフォーマットを図4.15に示すプリアンプルとヘッダ、シンボルデータを含めたパケット長さが 68bit になる。ヘッダには、インタリーブを元に戻すための情報やチェックサムを付加することを想定している。

符号化利得を求める方法として、式(4.22)の Q 関数を用いた算出方法が RF 通信でよく知られている [97]。RF 通信における 2 元通信路の BPSK 方式において符号化されていない誤り率 P_{eBPSK} は、式(4.23)となり、硬判定における最小距離を用いた通信利得の理

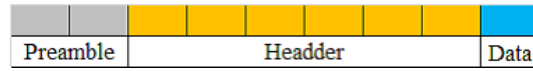


図 4.15: パケットフォーマット

論式率 P_{ecBPSK} は、式 (4.24) となる [97]. E_b/N_0 は、1 シンボル対ノイズあたりのエネルギーとパワー スペクトル密度比, R は符号化率, E_b^c/N_0 は、符号時における 1 ビットあたりのパワー スペクトル密度対ノイズのエネルギーとパワー スペクトル密度比, d_{min} は最小距離である.

$$Q_f(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \quad (4.22)$$

$$P_{eBPSK} = Q_f\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}\right) \quad (4.23)$$

$$P_{ecBPSK} = Q_f\left(\sqrt{\frac{d_{min}RE_b^c}{N_0}}\right) \quad (4.24)$$

式 (4.23), 式 (4.24) は、BPSK 方式の理論式であるため、光通信の OOK に対応した式を導出する. 今回は、情報ビット量を基準とし、式 (4.19) を用いて導出すると、式 (4.25), 式 (4.26) となる. E_b^c/N_0 は、1 信号あたりのパワー スペクトル密度対ノイズのエネルギーとパワー スペクトル密度比である.

$$P_{eOOK} = Q_f\left(\frac{1}{2}\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (4.25)$$

$$P_{ecOOK} = Q_f\left(\frac{1}{2}\sqrt{\frac{d_{min}RE_b^c}{N_0}}\right) \quad (4.26)$$

今回のシミュレーションでは、LDGM 符号において、パケット化によるヘッダの長さを考慮しない場合と考慮する場合の 2 種類と OOK との比較を行う. パケット化によるヘッダの長さを考慮しない場合の 1 シンボル対ノイズあたりのエネルギーとパワー スペクトル

ル密度比を E_s/N_0 とし、ヘッダを考慮した場合の1パケット対ノイズあたりのエネルギーとパワー スペクトル密度比を E_{sh}/N_0 とする. これらと, E_b^c/N_0 の関係は, 式 (4.27), 式 (4.28) となる. m は1シンボルあたりの bit 数, h_l はパケットのヘッダの bit 数を示す.

$$\frac{E_s}{N_0} = m \frac{E_b^c}{N_0} \quad (4.27)$$

$$\frac{E_{sh}}{N_0} = (m + h_l) \frac{E_b^c}{N_0} \quad (4.28)$$

以上より, パケット化によるヘッダの長さを考慮しない場合と考慮する場合の2種類の符号化利得の導出式は, 式 (4.29), 式 (4.30) となる.

$$P_s = Q\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{E_s R d_{min}}{2mN_0}}\right) \quad (4.29)$$

$$P_{sh} = Q\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{E_{sh} R d_{min}}{2(m+h_l)N_0}}\right) \quad (4.30)$$

また, 4.2節, 4.3節で用いた LDGM 符号パラメータとシミュレーション結果から求めた最小距離を表 4.4 に再掲する. 符号化利得の算出は表 4.4 のパラメータを用いて行う. ただし, 4.2節で得られた LDGM 符号における最小距離は, 消失通信路で求めた結果であり, 今回の検討における BER の算出式である式 (4.21) は, 2元通信路における硬判定であるため, 精度には差異があると考られる.

4.4.3 シミュレーション結果

LDGM 符号におけるシミュレーション結果を図 4.16 に示す. ビットエラーレートが 10^{-4} の OOK で誤り訂正が無い場合 ($SNR_{OOK} |_{10^{-4}}$), LDGM 符号を適用した場合 ($SNR_l |_{10^{-4}}$), LDGM 符号を適用してパケットヘッダを考慮した場合 ($SNR_{lh1} |_{10^{-4}}$, $SNR_{lh2} |_{10^{-4}}$) で比

表 4.4: LDGM 符号パラメータと最小距離 [92]

符号方式	LDGM
ガロア体	2^4
符号長 (N)	1000 (シンボル)
重み (jn, kn)	(7, 7)
符号化率 (R)	0.5
最小距離	200

較を行う。パケットヘッダを考慮した場合の解析は、ヘッダ長さを 64bit ($SNR_{lh1} |_{10^{-4}}$) と 32bit ($SNR_{lh2} |_{10^{-4}}$) の 2 つの長さについて検討した。

LDGM 符号化に伴う符号化利得は、式 (4.31)、式 (4.32)、式 (4.33) と表すことができ、それぞれの利得は、約 11dB、約 -1dB、約 1dB ほどの符号化利得を得ることができる。

$$Tg_l = \frac{SNR_{ook} |_{10^{-4}}}{SNR_l |_{10^{-4}}} \quad (4.31)$$

$$Tg_{lh2} = \frac{SNR_{ook} |_{10^{-4}}}{SNR_{lh1} |_{10^{-4}}} \quad (4.32)$$

$$Tg_{lh2} = \frac{SNR_{ook} |_{10^{-4}}}{SNR_{lh2} |_{10^{-4}}} \quad (4.33)$$

パケットヘッダを考慮した場合に符号化利得が低下するのは、今回のシミュレーション条件では、消失通信路における消失をパケットにより判別を行うため、パケット長さが長くなるとパケットを正常に受け取るために必要なビットエラーレートの要求が高目になる。パケットヘッダが 64bit になると、OOK 通信よりも必要な SNR が増加するが、パケットヘッダが 32bit の場合は、約 1dB の符号利得をえることができる。そのため、符号データを送る際のパケットヘッダが短くなるように、パケットヘッダを短くするか、1 パケット

あたりの送信する符号データ量を増やすことで、1シンボルあたりに対するパケットヘッダの割合が低下するため、符号化利得が増加する。ただし、パケットによる符号データのエラー判定を行っているため、パケットがエラーと判別されるとパケット内に含まれるすべてのシンボルがエラーになり、パケット化によるバーストエラーが発生する。それを防ぐために、インタリーブを適用させたり、パケット化するときを選択するシンボルをランダムに選択して分散させる等を行うことにより、対処することができると考えている。

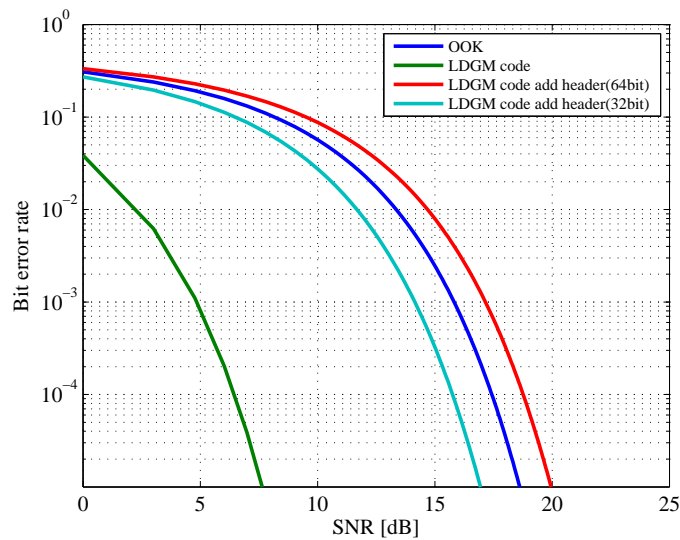


図 4.16: LDGM 符号における符号化利得

4.5 衛星-地上間光通信の回線設計

4.5.1 回線設計の条件

本論文での、3章の高度変化に対応したシングルモードファイバカップリング理論と精追尾機構、本章での符号化利得の結果から、どのように品質向上に効果があるかを回線設計に基づき示す。衛星-地上間光通信における回線計算の受信電力 P_R は、式 (4.34) を用いて計算することができる [99–101].

$$P_R = P_T \cdot O_{lt} \cdot G_t \cdot S_{lp} \cdot S_{la} \cdot S_a \cdot S_f \cdot G_r \cdot O_{lr} \quad (4.34)$$

式の中におけるそれぞれの記号は、 P_T は送信電力、 O_{lt} は送信光学系損失、 G_t は送信利得、 S_p は指向損失、 S_{la} は大気揺らぎ損失、 S_a は大気透過率、 S_f は自由空間損失、 G_r は受信利得、 O_{lr} は受信光学系損失である。

また、 G_t 、 S_f 、 G_r は、式(4.35)、式(4.36)、式(4.37)で求めることができる [100].

$$G_t = 8\left(\frac{\pi w_0}{\lambda}\right)^2 \quad (4.35)$$

$$S_f = \left(\frac{\lambda}{4\pi L}\right)^2 \quad (4.36)$$

$$G_r = \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \quad (4.37)$$

w_0 はレーザのビーム半径、 λ はレーザの波長、 L は通信距離、 D は受信アンテナの直径である。次に、今回用いる通信回線の条件とこの条件で算出した地上局における受信電力を表 4.5 に示す。ただし、衛星による指向損失が無いものとする。

この条件の場合、受信電力 P_R は -38.8dBm を地上局で受信することができる。通信時における必要な受信電力 W は、式(4.38)で算出することができる。

$$W = \frac{R_p T p c}{\lambda} \quad (4.38)$$

R_p は受信センサ感度、 T は通信速度、 p はプランク係数、 c は光の速度である。式(4.38)を用いて通信速度を 1Mbps~100Gbps に変化した場合の必要受信電力の算出結果を表 4.6 を示す。

通信が成立するには、通信速度における必要受信電力よりも強いパワーで受信する必要がある。表 4.5 で求めた受信電力 P_R と表 4.6 から、100Mbps で通信が可能であることが

表 4.5: 通信回線の条件と地上局における受信電力

項目	値	単位
通信距離 L	1000	km
レーザー波長 λ	850	nm
送信電力 P_T	100	mW
広がり角度	100	urad
大気揺らぎ損失 S_{la}	-15	dB
透過損失 S_{la}	-4	dB
送信光学系損失 O_{lt}	-2	dB
受信光学系損失 O_{lr}	-3	dB
受信開口直径 D	1.0	m
受信センサ感度 R_p	1500	photons/bit
受信電力 P_R	-38.8	dBm

表 4.6: 各通信速度における必要受信電力

通信速度	必要受信電力
1Mbps	-65 dBm
10Mbps	-55 dBm
100Mbps	-45 dBm
1Gbps	-35 dBm
10Gbps	-25 dBm
100Gbps	-15 dBm

判明した.

4.5.2 符号化の適用

表 4.5 の受信電力 P_R に, 4.4 節で求めた符号化利得 T_{gl} がそのまま適用できると仮定すると, 受信電力 P_{Rc} は, 式 (4.39) となり, 受信電力 P_{Rc} は -27.8dBm となる. そのため, 何も適用しない場合の受信電力 P_R では, 100Mbps であったが, 符号化を適用することにより, 表 4.6 の通信速度 1Gbps に必要な -35dBm を満たしているため, 通信速度の 1Gbps への高速化, もしくは SNR の向上による通信品質の向上が期待できる.

$$P_{Rc} = P_R \cdot T_{gl} \quad (4.39)$$

4.5.3 精追尾機構と光アンプの適用

表 4.5 の受信電力 P_R に精追尾機構と光アンプの適用を考える. 3章で示した精追尾機構を用いて, 空間からシングルモードファイバへのカップリングを行い, 3章の OICETS 実験と条件を同一にした場合, シングルモードファイバへのカップリング損失 η_z は -17dB となる. 精追尾機構を用いない場合は, シングルモードファイバへの受光量は, 最大受信感度が -65dBm の光パワーメータで認識できないレベルであった. そして, シングルモードファイバへ入る前の受光パワーと光パワーメータの最大受信感度から損失を求めると -20dB 以上となり, 精追尾機構を用いることにより, 少なくとも 3dB 以上改善され, シングルモードファイバへのカップリングが可能となる. したがって, シングルモードファイバへのカップリング後に光アンプを適用することができる. 光アンプの利得 G_{amp} を 30dB とした場合, 精追尾機構と光アンプを適用させた場合の受信電力 P_{Ra} は, 式 (4.40) で求められる.

$$P_{Ra} = P_R \cdot \eta_z \cdot G_{amp} \quad (4.40)$$

精追尾機構と光アンプを適用させた場合の受信電力 P_{Ra} は、何も適用しない受信電力 P_R に対して、13dB の改善ができるため、-25.8dB となる。精追尾機構と光アンプの適用により、表 4.6 の通信速度 1Gbps よりも受信電力が高いため、高速化と通信品質の向上を期待することができる。

さらに、符号化利得も適用できるため、前述の符号化利得 T_{gl} を同様に適用する。精追尾機構、光アンプ、符号化を適用した P_{Rac} は、式 (4.41) となり、24dB の利得を得ることができるため、-14.8dB となる。

$$P_{Rac} = P_R \cdot \eta_z \cdot G_{amp} \cdot T_{gl} \quad (4.41)$$

表 4.7 に各適用手法における受信電力のまとめを示す。表 4.6 の通信速度における必要受信電力から、精追尾機構、光アンプ、符号化を適用させると本論文の条件では、100Gbps の通信においても可能であることを示している。

表 4.7: 各適用手法における受信電力のまとめ

	受信電力
何も適用しない場合 P_R	-38.8 dBm
符号化の適用 P_{Rc}	-27.8 dBm
精追尾機構、光アンプの適用 P_{Ra}	-25.8 dBm
精追尾機構、光アンプ、符号化の適用 P_{Rac}	-14.8 dBm

4.6 まとめ

実際に OICETS 実験で得られたデータから伝搬モデルを提案し、シミュレーションによる誤り訂正符号の能力を検証した。伝搬モデルは、広く使われている大気揺らぎのパワースペクトルを表す関数である Von Karman スペクトルに基づき算出されている。伝搬モデルから出力されたシミュレーションデータと OICETS 実験から得られたデータのスペクトルを比べたところ似通った特性を保持していることを確認した。符号方式として LDGM 符号を用いて通信品質の改善に、どの程度の効果があるかを検証した。LDGM 符号の特性の確認を行い、今回用いた符号パラメータでは、LDGM 符号は約 40 % 程度の誤り訂正の能力があることを確認した。

今回用いた伝搬モデルにおいては、ブロックインターリーブの深さを 1ms に必要な 250 にすれば、ランダム通信路と同等の LDGM 符号で約 40 % の誤り訂正の能力を発揮することが確認できた。また、符号化利得の検討を行い、OOK 方式における LDGM 符号化利得を検討したところ、パケットのヘッダを考慮しない場合は、約 10dB の利得があり、ヘッダを考慮した場合には、ヘッダの長さによって約 1dB～約-1dB の利得を得ることが確認できた。今回の検討条件では、パケットのヘッダを考慮すると利得が下がってしまうため、ヘッダを無視できるようにパケットのペイロード量を増やしたり、パケットヘッダを短くするためにフォーマットやパケットの符号化を今後検討する必要がある。

回線設計においては、3 章でのシングルモードファイバのカップリング理論、精追尾機構、光アンプ、本章での符号化を適用させた場合、回線計算においてどの様に変化するかの検討を行った。検討結果から、今回の条件では、24dB の利得の向上が可能であることを示した。

また、今回の誤り訂正符号の検討では用いなかったが、積符号を今後検討する必要があると考える。積符号は、 $k_1 \times k_2$ の情報に対して、行方向に符号化を行った後に、列方向に符号化を行う方法である。行と列の符号化を行う順序は逆でも行うことができる。積符

号を行うことで、符号の訂正能力が良くなることが知られている [88]. 行方向と列方向に対する符号化は、別の符号方法を用いることも可能であるため、宇宙光通信に適した積符号の組み合わせも検討する必要があると考えている.

第5章 結論

近年、衛星のセンサや光学カメラの解像度の向上により、衛星通信における通信データ容量が増加傾向にある。現在、宇宙通信で広く使われている通信方法は、Radio Frequency(RF)通信であり、RF通信の最大通信速度は、日本の衛星である超高速インターネット衛星(WINS)の3.2Gbpsである。現在のRF通信では、1キャリア当たりの通信容量を今後の必要になるであろう数十Gbpsにするのは困難である。また、RF通信はレーザー空間光通信に比べて広がり角が大きく周波数の干渉問題が発生する。今後の大容量高速通信という課題を解決するための方法として、現在、レーザーを用いた宇宙光通信が注目されている。これまでの宇宙光通信の研究で、宇宙と地上間、または衛星間において宇宙光通信が可能であることが証明された。ただし、定常的な通信手段として宇宙光通信を用いるためには、衛星-地上間光通信における雲や大気揺らぎなどによる通信品質の劣化、遮断という問題を解決する必要がある。

本論文では、宇宙光通信における通信品質の安定化と向上を目的として、大気揺らぎの影響を低減させる手法の適用を試みた。この大気揺らぎによる通信品質劣化の改善を、第1の手法として物理層に対して高速制御可能な精追尾機構を用いたファイバカップリング技術を適用させた。第2の手法として、物理層より上の層においてデジタル信号に変換した後に誤り訂正符号を適用させた。以上の2手法を異なる層のプロトコルに対して適用させ、衛星-地上間光通信の通信品質の向上を試みた。

これまで大気揺らぎを考慮した水平伝搬で検討された空間光通信のシングルモードファイバへのファイバカップリング効率の理論に、斜め方向の高度変化に対応した衛星-地上間光通信シングルモードファイバへのファイバカップリング効率の理論式を新たに拡張提

案し、数値シミュレーションと実証実験で検証した。実施したシミュレーションの範囲では、水平伝搬で検討された空間光通信のシングルモードファイバへのファイバカップリング効率の理論では、通信距離を長くした場合、ゼロに収束する可能性がある。しかし、今回提案した斜め方向の高度変化に対応した衛星-地上間光通信シングルモードファイバへのファイバカップリング効率の理論式では、より実験環境に近い値を表すことができた。

実際に低軌道上にある光衛星間通信実験衛星 (OICETS) を用いて、衛星-地上間の伝搬路における大気揺らぎを受けた光受信信号を精追尾機構を用いて、シングルモードファイバに光を導く実験を実施した。この実験で、地上局に設置した精追尾機構により大気揺らぎによる影響を低減し、シングルモードファイバに光を導くことができることを実証した。実験結果より、精追尾機構動作時におけるシングルモードファイバへのファイバカップリング損失は、およそ-11~-18dB で推移していることを確認した。得られた実験データとシミュレーションデータを比較したところ、大気揺らぎを考慮したシングルモードファイバへのファイバカップリング効率の理論式を用いた数値シミュレーション結果は、-17dB の損失であった。そのため、新たに提案したシングルモードファイバへのファイバカップリング効率の理論式は、妥当であると判断している。

次に、低軌道衛星-地上間光通信における誤り訂正符号の検討を行った。低軌道衛星-地上間光通信においては、実証例がまだ少なく十分な実験データがないため、RF 通信のような広く使われている伝搬モデルは存在しない。実際に OICETS 実験のデータに基づく伝搬モデルを用いて、シミュレーションにより通信品質を検証した。実験のデータから得られたモデルであるため、伝搬モデルの一例であるが、実際の衛星-地上間光通信実験のデータに基づく伝搬モデルを用いた通信品質の検証は有意義であると考えられる。この伝搬モデルを用いて衛星-地上間光通信における誤り訂正符号の最適なインタリーブ長さを検証した。

符号化の検討では、LDGM 符号を用いて検討を行った。ランダム消失通信路において、今回用いた符号のパラメータ条件では、40%程度の訂正能力があることが確認できた。ま

た、大気揺らぎモデルを用いた通信の場合、バーストエラーによって訂正能力が低下して5%程度に落ちる。大気揺らぎを考慮した通信路の場合、インタリーブを1ms適用することにより、バーストエラーがランダムエラーのようなエラー分布になり、大気揺らぎに起因するバースト誤りの訂正に効果を発揮することが確認できた。今回得られたブロックインタリーブの時間は、大気揺らぎに対する結果であるため、通信速度が数十Gbpsになっても大気揺らぎによって発生する影響は同じであると考えられるため、同様にインタリーブによる通信品質の向上が得られると考えている。

回線設計においては、3章でのシングルモードファイバのカップリング理論、精追尾機構、光アンプ、本章での符号化を適用させた場合、回線計算においてどの様に変化するかの検討を行った。検討結果から、今回の条件では、24dBの利得の向上が可能であることを示した。今回の誤り訂正符号の検討では用いなかったが、積符号を今後検討する必要があると考える。積符号を行うことで、符号の訂正能力が良くなることが知られている。行方向と列方向に対する符号化は、別の符号方法を用いることも可能であるため、宇宙光通信に適した積符号の組み合わせも検討する必要があると考えている。

本論文の研究成果が、衛星-地上間光通信における通信品質の安定化と向上に寄与すると考えている。定常的な通信手段として衛星-地上間光通信を使用するには、改善すべき課題が多くある。そのため、今後も研究活動を進めて行きたいと考えている。

謝辞

研究を進めるにあたっての方針や進め方等様々な観点から多くのご指導，助言を頂いた高山佳久 客員准教授並びに情報通信研究機構の豊嶋守生 研究室長に深く感謝いたします。また，森田啓義 教授には貴重な助言を頂き感謝いたします。情報通信研究機構においては職員の方々から，研究について多くのアドバイスをいただくと共に，社会人の先輩として多くのことを学ばせていただき感謝いたします。最後に所属講座の末廣尚士教授，工藤俊亮准教授，富沢哲雄助教にも，多方面からご指導いただき感謝いたします。

参考文献

- [1] 加藤正人, "IRS データによる森林現況の把握," 日本林學會誌 83, 211—219 (2001).
- [2] 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 鉱物資源探査技術開発等調査報告書 リモートセンシングによる探査技術開発 (2005).
- [3] 廣瀬貴史, "大規模震災時における衛星通信：東日本大震災で利用された災害対策衛星通信システムについて(マイクロ波フォトニクス技術, 一般)," 電子情報通信学会技術研究報告. OPE, 光エレクトロニクス 111, 39—43 (2011).
- [4] 山田良透, 上田誠治, 奥村晴彦, "JASMINE プロジェクトのためのデータ圧縮技術," 国立天文台報 8, 15—20 (2005).
- [5] 地球観測データ利用ビジネスコミュニティ, "増加する衛星画像のデータ量への対策," <http://www.remosen.jp/vti12.html>
- [6] D. Powell, "Lasers boost space communications.," Nature 499, 266—7 (2013).
- [7] 豊嶋守生, "衛星間レーザ通信の捕そく・追尾・指向技術：電波と光波通信システムの比較と利用動向," 電子情報通信学会誌 88, 276—283 (2005).
- [8] P. R. Bond, Ihs Jane 's Space Systems & Industry 2013/2014 (Jane 's Information Group, 2013), p. 1-1000.
- [9] B. M. Shimada, T. Tadono, A. Rosenqvist, "Advanced Land Observing Satellite (ALOS) and Monitoring Global Environmental Change," 98, (2010).

- [10] Y. Okada, T. Hamasaki, M. Tsuji, M. Iwamoto, K. Hariu, Y. Kankaku, S. Suzuki, and Y. Osawa, "Hardware performance of L-band SAR system onboard ALOS-2," 2011 IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. 894—897 (2011).
- [11] 島田政信, 勘角幸弘, 会田芳久, "ALOS-2 の現状と受信機衛星群による森林観測及び DEM 作成," http://www1.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/~hasimoto/Manabu/InSAR_WS2009/Presentation/Shimada_ALOS-2.pdf
- [12] 文部科学省, "防災のための地球観測衛星システム等の構築及び運用の進め方について," http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/kaihatu/004/toushin/06103014.htm
- [13] H. Imai, H. Katayama, T. Imai, S. Suzuki, "A Conceptual Design of the Optical Satellite for the Post-ALOS Program," Symposium on Space (2009).
- [14] N. Kadowaki, R. Suzuki. "Overview of the wideband internetworking engineering test and demonstration satellite project." Journal of the National Institute of Information and Communications Technology 54.4 (2007): 3-10. APA
- [15] 情報通信研究機構, "「きずな」で世界最高速 3.2Gbps の衛星伝送に成功," <http://www.nict.go.jp/press/2014/05/12-1.html>
- [16] 総務省, "周波数の国際調整について," <http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/process/freqint/>
- [17] 総務省, "電波法," <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S25/S25HO131.html>
- [18] D. L. FRIED, "Scintillation of a Ground-to-Space Laser Illuminator," J. Opt. Soc. Am. 57, 980-983 (1967)
- [19] P. MINOTT, "Scintillation in an earth-to-space propagation path," JOSA 62, 885—888 (1972).

- [20] T. Aruga, K. Araki, T. Igarashi, F. Imai, Y. Yamamoto, F. Sakagami, "Earth to space laser beam transmission for spacecraft attitude measurement," *Applied Optics*, Vol. 23, pp.114-147,(1984).
- [21] 荒木賢一, 板部敏和, 高部政雄, 規有賀, 猪股英行, "静止気象衛星ひまわり3号へのCO₂レーザ光伝送実験," *レーザ・センシングシンポジウム*, 12, 47—48, (1988)
- [22] H. Kunimori, K. Imamura, F. Takahashi, T. Itabe, T. Aruga, A. Yamamoto, "New development of satellite laser ranging system for highly precise space and time measurements," *Commun. Res. Lab. J.* 38, 303—317 (1992).
- [23] N. Koga, N. Sugimoto, K. Ozawa, Y. Saito, A. Nomura, A. Minato, T. Aoki, T. Itabe, H. Kunimori, "Laser long-path absorption experiment using the Retroreflector in Space (RIS) on the ADEOS satellite," in *Aerospace Remote Sensing '97*, U. Schreiber and C. Werner, eds. (International Society for Optics and Photonics, 1997), pp. 10—18.
- [24] 有本 好徳, 豊嶋 守生, 豊田 雅宏, 高橋 鉄雄, 鹿谷 元一, 荒木 賢一, "ETS-VIを用いた双方向レーザ伝送実験," *電子情報通信学会総合大会講演論文集 1995*, 587—588 (1995).
- [25] T. Tolker-Nielsen, G. Oppenhauser, "In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX," in *High-Power Lasers and Applications*, G. S. Mecherle, ed. (International Society for Optics and Photonics, 2002), pp. 1—15.
- [26] A. Alonso, M. Reyes, Z. Sodnik, "Performance of satellite-to-ground communications link between ARTEMIS and the Optical Ground Station," in *Remote Sensing*, J. D.

- Gonglewski and K. Stein, eds. (International Society for Optics and Photonics, 2004), pp. 372—383.
- [27] M. Toyoshima, S. Yamakawa, T. Yamawaki, K. Arai, M. Reyes, A. Alonso, Z. Sodnik, B. Demellenne, "Ground-to-satellite optical link tests between Japanese laser communications terminal and European geostationary satellite ARTEMIS," in *Lasers and Applications in Science and Engineering*, G. S. Mecherle, C. Y. Young, and J. S. Stryjewski, eds. (International Society for Optics and Photonics, 2004), pp. 1—15.
- [28] Z. Sodnik, B. Furch, H. Lutz, "Optical Intersatellite Communication," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 16, 1051—1057 (2010).
- [29] T. Jono, Y. Takayama, K. Shiratama, I. Mase, B. Demellenne, "Overview of the inter-orbit and orbit-to-ground laser communication demonstration by OICETS," *Sp. Technol.* (2006).
- [30] N. Perlot, M. Knapek, D. Giggenbach, J. Horwath, M. Brechtelsbauer, Y. Takayama, T. Jono, "Results of the optical downlink experiment KIODO from OICETS satellite to optical ground station Oberpfaffenhofen (OGS-OP)," in *Lasers and Applications in Science and Engineering*, S. Mecherle and O. Korotkova, eds. (International Society for Optics and Photonics, 2007), pp. 645704—645704—8.
- [31] 白玉公一, 相菌充江, 熊谷健夫, 池辺憲一, 間瀬一郎, 城野隆, 高山佳久, 大日向幸一, 倉伸宏, 小山善貞, 荒井功恵, 阿部旬也, 光衛星間通信実験衛星 (OICETS) の光衛星間通信機器の軌道上評価, 電子情報通信学会 SANE2006, 77, (2006)
- [32] 豊嶋守生, 高山佳久, 國森裕生, 城野隆, "地上一低軌道衛星間光通信回線における受信光変動の確率密度関数の検討," 第25回レーザセンシングシンポジウム,p-30, (2007)

- [33] W. Pitz, D. Miller, "The TerraSAR-X Satellite," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 48, 615—622 (2010).
- [34] K. E. Wilson, J. Kovalik, A. Biswas, M. Wright, W. T. Roberts, Y. Takayama, S. Yamakawa, "Preliminary results of the OCTL to OICETS optical link experiment (OTOOLE)," in *SPIE LASE*, H. Hemmati, ed. (International Society for Optics and Photonics, 2010), pp. 758703—758703—13.
- [35] 高山佳久, 豊嶋守生, "OICETS を使用したレーザ通信実験の国際キャンペーン," *NICT 季報 光衛星間通信実験衛星 (OICETS) 特集*, vol.58 1/2, p99-103, (2012)
- [36] 豊嶋守生, 竹中秀樹, シェーフアクリスチャン, 荘司洋三, 高山佳久, 小山善貞, 国森裕生, 山川史朗, 岡本英二, "地上—OICETS 間光通信回線を用いた大気中レーザ伝搬特性取得と要素技術の実証実験," *電子情報通信学会 SANE*, 28, (2009).
- [37] Guetlich Bjoern, "Input for CCSDS Blue Books," <http://cwe.ccsds.org/sls/docs/SLS-OPT/Meeting%20Materials/2014/Spring/OPT-TESAT-LCT-TNO-1628-2014-03-18.pdf>
- [38] Guetlich Bjoern , "Tesat LCT physical layer, modulation and coding Input for CCSDS Blue Books," <http://cwe.ccsds.org/sls/docs/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=%2fsls%2fdocs%2fSLS-OPT%2fMeeting%20Materials%2f2014%2fSpring&FolderCTID=&View=%7b16ACDA38-FFA3-4657-8F27-B166C23C24A2%7d>
- [39] X. Sun, D. R. Skillman, E. D. Hoffman, D. Mao, J. F. McGarry, L. McIntire, R. S. Zellar, F. M. Davidson, W. H. Fong, M. A. Krainak, G. A. Neumann, M. T. Zuber, D. E. Smith, "Free space laser communication experiments from Earth to the Lunar Reconnaissance Orbiter in lunar orbit.," *Opt. Express* 21, 1865—71 (2013).

- [40] Z. Sodnik, H. Smit, M. Sans, I. Zayer, M. Lanucara, K. Schulz, D. Giggenbach, P. Becker, R. Mata-calvo, C. Fuchs, J. Widmer, F. Arnold, M. Mosberger, A. Alonso, I. Montilla, "Results from a Lunar Laser Communication Experiment between NASA's LADEE Satellite and ESA's Optical Ground Station," ICSOS 9, (2014).
- [41] M. Mosberger, J. Widmer, F. Arnold, F. Gambarara, "Receiver Performance of ESA Ground Terminal During Lunar Laser Communication Demonstration (LLCD)," ICSOS 9, (2014).
- [42] J. H. B. Moision, "Coded Modulation for the Deep-Space Optical Channel: Serially Concatenated Pulse-Position Modulation," The Interplanetary Network," (n.d.).
- [43] J. C. Owens, "Optical refractive index of air: dependence on pressure, temperature and composition.," Appl. Opt. 6, 51—9 (1967).
- [44] J. D. Barry, "Beam pointing error as a significant design parameter for satellite-borne, free-space optical communication systems," Opt. Eng. 24, 241049 (1985).
- [45] Y. Takayama, Y. Koyama, H. Takenaka, "Studies on candidate approaches for satellite-ground laser communications," 12, 2—6 (2012).
- [46] K. MORITA I. HIGUTI, "Statistical Studies on Rain Attenuation and Site Diversity Effect on Earth to Satellite Links in Microwave and Millimeter Wavebands," IEICE Trans. E61-E, 425—432 (1978).
- [47] 緒方孝昭, "光海底ケーブルシステムの現状と動向," NEC 技報 Vol.62 No.4, (2009)
- [48] 総務省, "我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計・試算," http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_02000077.html

- [49] V. A. J. M. Sleiffer, V. Veljanovski, D. van den Borne, J. Capasso, H. Kuluslu, J. Seixas, V. Schramm, A. Tschersich, R. Nogueira, N. B. Pavlovic, K. Ivarson, S. Spaelter, H. de Waardt, "45.8 and 125 Gb/s CP-QPSK/CP-BPSK Field Trial Over Installed Submarine Cable," *J. Light. Technol.* 30, 624—633 (2012).
- [50] 菊池和朗, "光情報ネットワーク," (オーム社, 2002), p. 236.
- [51] 小山善貞, 荘司洋三, 高山佳久, 豊嶋守生, 国森裕生, "B-3-5 宇宙光通信の実証と展望 : (5) 宇宙環境を想定した光アンプの設計 (B-3. 衛星通信, 一般セッション)," *電子情報通信学会総合大会講演論文集 2009*, 323 (2009).
- [52] 荒木賢一, 有本好徳, "光通信実験の概要," *通信総合研究所季報*, Vol.43 No.3, (1997)
- [53] C. Cox, E. Ackerman, R. Helkey, G. E. Betts, "Techniques and Performance of Intensity-Modulation Direct-Detection Analog Optical Links," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 45, 1375—1383 (1997).
- [54] K.-P. Ho, *Phase-Modulated Optical Communication Systems* (2005).
- [55] 和田山正, "誤り訂正技術の基礎," 森北出版, (2010)
- [56] 大槻知明, "誤り訂正符号," *IEICE Trans. Commun.*, VOL.E89-B, NO. 1, Jan. (2006).
- [57] M. Uysal, "Error rate performance analysis of coded free-space optical links over gamma-gamma atmospheric turbulence channels," *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 5, 1229—1233 (2006).
- [58] H. G. Sandalidis, T. A. Tsiftsis, G. K. Karagiannidis, M. Uysal, "BER Performance of FSO Links over Strong Atmospheric Turbulence Channels with Pointing Errors," *IEEE Commun. Lett.* 12, 44—46 (2008).

- [59] K. L. E. Law, A. Goldenberg, "MEMS optical switches," *IEEE Commun. Mag.* 39, 158—163 (2001).
- [60] P. De Dobbelaere, "Digital MEMS for optical switching," *Commun. ...* 88—95 (2002).
- [61] S. Sato, "Liquid-crystal lens-cells with variable focal length," *Jpn. J. Appl. Phys.* (1979).
- [62] R. a Soref, "Liquid-crystal fiber-optic switch.," *Opt. Lett.* 4, 155—7 (1979).
- [63] Robert K. Tyson, "INTRODUCTION TO ADAPTIVE OPTICS," SPIE,(200)
- [64] Francois Roddier "Adaptive Optics in Astronomy," Cambridge university press, (1999)
- [65] Z. Sodnik, J. Perdignes Armengol, R. H. Czichy, and R. Meyer, "Adaptive optics and ESA 's optical ground station," in *SPIE Optical Engineering + Applications*, A. K. Majumdar and C. C. Davis, eds. (International Society for Optics and Photonics, 2009), pp. 746406—746406—9.
- [66] T. Abe, T. Kizaki, H. Kunimori, Y. Takayama, M. Toyoshima, "The Development of Two-axes Fast Steering Mirror and High Efficiency Driver," *Proceedings of the 52nd Space Science and Technology Conference*, 1F16 (2008).
- [67] M. Toyoshima, "Maximum fiber coupling efficiency and optimum beam size in the presence of random angular jitter for free-space laser systems and their applications," *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 23, No. 9, pp.2246-2250 (2006).
- [68] Y. Dikmelik, F. M. Davidson, "Fiber-coupling efficiency for free-space optical communication through atmospheric turbulence," *Applied Optics*, Vol. 44, No. 23, pp.4946-4952 (2005).

- [69] S. Shaklan, F. Roddier, "Coupling starlight into single-mode fiber optics.," *Appl. Opt.* 27, 2334—8 (1988).
- [70] 久保田周治, "誤り訂正技術の応用," 電子情報通信学会「知識ベース」 1—9 (2010).
- [71] Marvin K. Simon, Life Fellow, Victor A. Vilmrotter "Alamouti-Type Space—Time Coding for Free-Space Optical Communication With Direct Detection," *TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS*, VOL. 4, NO. 1 , (2005)
- [72] J. M. Kahn, "Performance bounds for coded free-space optical communications through atmospheric turbulence channels," *IEEE Transactions on Communications* 51, 1233—1239 (2003).
- [73] I. S. Reed, G. Solomon, "Polynomial Codes Over Certain Finite Fields," *J. Soc. Ind. Appl. Math.* 8, 300—304 (1960).
- [74] R. G. Gallager, "Low Density Parity Check Codes," *IEEE Trans. Inf. Theory* IT-8, 21—28 (1962).
- [75] V. RoLDPCnd C. Neumann, "Design, Evaluation and Comparison of Four Large Block FEC Codecs, LDPC, LDGM, LDGM Staircase and LDGM Triangle, plus a Reed-Solomon Small Block FEC Codec," , INRIA Research Report RR-5225, June (2004).
- [76] Djordjevic. I , "LDPC-coded OAM modulation and multiplexing for deep-space and near-Earth optical communications," *Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, 327—335 , (2011).
- [77] 坂上修二, 久保井潔, "市街地構造を考慮した伝搬損の推定," 電子情報通信学会論文誌 B-(0xF9C2) 通信 74, p17—25 (1991).

- [78] 藤井輝也, "陸上移動通信における伝搬損推定式: "坂上式"の拡張," 電子情報通信学会論文誌. B, 通信 86, 2264—2267 (2003).
- [79] M. Toyoshima, H. Takenaka, Y. Takayama, "Atmospheric turbulence-induced fading channel model for space-to-ground laser communications links," *Opt. Express* 19, 15965 (2011).
- [80] Joseph W. Goodman, "統計光学," 丸善 (1992).
- [81] A. Kolmogorov, "The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers," *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 30, 9—13 (1941).
- [82] Larry C. Andrews "Atmospheric Optics", SPIE Oeder No.FG02
- [83] R. Beland, "Propagation through atmospheric optical turbulence," in *The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook*, F. G. Smith, Ed., SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA (1993).
- [84] M. G. Miller and P. L. Zieske, "Turbulence Environment Characterization," (1979).
- [85] L. C. Andrews, R. L. Phillips, and C. Y. Hopen, "Laser Beam Scintillation with Applications," SPIE Press (2001)
- [86] L. C. Andrews, R. L. Philips and P. T. Yu, "Optical scintillation and fade statistics for a satellite-communication system," *Applied Optics*, Vol.34, No.33, pp. 7742-7751 (1995).
- [87] L. C. Andrews, and R. L. Phillips, "Laser Beam Propagation Through Random Media," (Society of Photo Optical, 2005).
- [88] 今井秀樹, "情報・符号・暗号の理論," コロナ社, 2004.

- [89] 西村芳一, "デジタル・エラー訂正技術入門," CQ 出版, 2010.
- [90] 今井秀樹, "符号理論," 電子情報通信学会 (コロナ社), 1990, p. 356.
- [91] 和田山正, "低密度パリティ検査符号とその復号法について," 映像情報メディア学会技術報告 25, 39—46 (2001).
- [92] H. Takenaka, M. Toyoshima, Y. Shoji, Y. Takayama, Y. Koyama, and M. Akioka, "Evaluation of the optical communication system for Small Optical Transponder (SOTA) based on the laboratory," Int. Astronaut. Congr. 62, (2011).
- [93] Yoshisada Koyama, Yoshihisa Takayama, Maki Akioka, Hideki Takenaka, Yasushi Munemasa, and Morio Toyoshima, "Completion of the Small Optical Transponder Development for satellite-ground laser communication demonstrations," AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), Florence, Italy, October 14-17, 2013
- [94] "AES 衛星 - SOCRATES - ", http://www.aes.co.jp/product/pdf/socrates_hp_j.pdf
- [95] I. Djordjevic, W. Ryan, and B. Vasic, "Coding for Optical Channels ," (Springer Science & Business Media, 2010), p. 460.
- [96] 小林郁太郎, "光通信工学 (1)," (コロナ社, 1998), p. 163.
- [97] J. B. Anderson, and A. Svensson, "Coded Modulation Systems," (Springer Science & Business Media, 2003), p. 485.
- [98] H. Takenak, and M. Toyoshima, "Study on the fiber coupling efficiency for ground-to-satellite laser communication links", SPIE Photonics West2009,1, 2010
- [99] H. Friis, "A note on a simple transmission formula," proc. IRE 254—256 (1946).

- [100] 荒木賢一, 有賀規, ”宇宙光通信技術,” レーザ学会 24, 1264—1271 (1996).
- [101] H. Takenaka, M. Toyoshima, Y. Shoji, Y. Takayama, Y. Koyama, and M. Akioka, ”Link budget analysis for small optical transponder onboard small satellites,” Int. Astronaut. Congr. 61, (2010).

業績

受賞

- [1] 平成 23 年度電子情報通信学会 学術奨励賞, 講演題目:”超小型衛星搭載小型光トランスポンダを用いた光通信の実験計画 (総合大会)”, ”衛星-地上間光通信回線における符号化の実装に関する検討 (ソサエティ大会)”, 平成 24 年 3 月 21 日

ジャーナル論文

- [1] H. Takenaka, M. Toyoshima, Y. Takayama, “Experimental verification of fiber-coupling efficiency for satellite-to-ground atmospheric laser downlinks,” *Optics Express*, vol. 20, no. 14, p. 15301, (2012). (関連論文: 本文第 3 章)
”<http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-20-14-15301>”

国際発表

- [1] H. Takenaka, M. Toyoshima, Y. Takayama, Y. Koyama, M. Akioka, E. Okamoto, T. Kyo ”Study on Error Coding Program for Implementation in SOTA”, International Conference on Space Optical Systems and applications, Vol.3, (2012) .
- [2] H. Takenaka, M. Toyoshima, Y. Shoji, Y. Takayama, Y. Koyama, M. Akioka, ”Evaluation of the optical communication system for Small Optical TrAnsponder (SOTA) based on the laboratory,” International Astronautical Congress, Vol.62 (2011) (関連論文: 本文第 4 章).

- [3] H. Takenaka, M. Toyoshima, Y. Takayama, Y. Koyama, M. Akioka, "Experiment plan for a small optical transponder onboard a 50 kg-class small satellite," International Conference on Space Optical Systems and applications, Vol.2, pp.113—116 (2011).
- [4] H. Takenaka, M. Toyoshima, "Study on the fiber coupling efficiency for ground-to-satellite laser communication links," Proc.SPIE 7587, 1—12 (2010) (関連論文：本文第3章).
- [5] H. Takenaka, M. Toyoshima, "Study of fiber coupling efficiency for ground-to-satellite ground to satellite laser communication links using OICETS," Ground-to-OICETS Laser Communications Experiments, Vol.1 (2010).
- [6] H. Takenaka, M. Toyoshima, "Study on optical communication link design for 50kg-class small satellites," International Conference on Space, Aeronautical and Navigational Electronics, Vol.IEICE-110, No.IEICE-SANE-250, pp.179—184 (2010)
- [7] H. Takenaka, M. Toyoshima, Y. Shoji, Y. Takayama, Y. Koyama, M. Akioka, "Link budget analysis for small optical transponder onboard small satellites," International Astronautical Congress, Vol.61 (2010).
- [8] H. Takenaka, C. Schaefer, M. Toyoshima, "Angle of arrival fluctuation in ground-to-satellite laser communication links," International Conference on Space Optical Systems and applications, Vol.1 (2009).
- [9] H. Takenaka, M. Toyoshima, "Study on the fiber-coupling efficiency for ground-to-satellite laser communications," Workshop for Space, Aeronautical and Navigational Electronics, Vol.IEICE-108 (2009).

国内発表

- [1] 竹中秀樹, 豊嶋守生, 高山佳久, 小山善貞, 秋岡眞樹, 岡本英二, 京拓磨, ”地上衛星間光通信における符号化の検討”, 第56回宇宙科学技術連合講演会, 3I05, 大分 (2012)
- [2] 竹中秀樹, 豊嶋守生, 佐々木崇, 高山佳久, 小山善貞, 秋岡眞樹, ”超小型衛星搭載小型光トランスポンダを用いた光通信の実験計画,” 電子情報通信学会総合大会, Vol.22340, pp.264 (2011).
- [3] 竹中秀樹, 豊嶋守生, ”超小型衛星搭載用光通信ターミナルにおける回線設計の検討,” 第54回宇宙科学技術連合講演会, (2010)
- [4] 竹中秀樹, 豊嶋守生, 佐々木崇, 高山佳久, 小山善貞, 秋岡眞樹, ”衛星－地上間光通信回線における符号化の実装に関する検討,” ソサイエティ 大会 (2011).
- [5] 竹中秀樹, 豊嶋守生, ”地上-衛星間光通信回線におけるファイバカップリング効率の理論検討”, 第53回宇宙科学技術連合講演会, 2D12, 京都 (2009)
- [6] 竹中秀樹, 豊嶋守生, ”地上－衛星間光通信回線を用いた精追尾機構の動作実証”, 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会,16, 茨城 (2009)
- [7] 竹中秀樹, 豊嶋守生, ”宇宙光通信の実証と展望－(2) 精追尾機構の動作実証－”, 電子情報通信学会 総合大会 2009, B-3-2 , 愛媛,(2009)

掲載記事

- [1] 竹中秀樹, 豊嶋守生, 高山佳久, “ダウンリンクのファイバ結合実験,” 情報通信研究機構季報, vol. 58, no. 1/2, p. 67-72, (2012).
”http://www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihou-journal/kihoulvol58-1_2.html”

WEB 記事

- [1] 竹中秀樹, 高山佳久, ”ICSOS2011 参加報告”, Space Japan Review 6 & 7, No.74 (2011) ”<http://satcom.jp/74/conferencereport1j.pdf>”

- [2] 竹中秀樹, 豊嶋守生, 高山佳久, ”光ダウンリンクのファイバ結合実験”, TELECOM FRONTIER, No.80 (2013) ”http://www.scat.or.jp/frontier/frontier80/mokuji_80.html”