

光空間通信における光学デバイスを活用した多元接続の検討

小川 賀代, 石田 友美
日本女子大学理学部数物科学科

(2007年1月31日受理)

要 旨 情報のデジタル化やインターネットの爆発的な普及により, 新しい通信帯域の開拓が求められており, 赤外線による光空間通信は高速・大容量通信を実現できる無線システムとして期待されている。現在, 屋外光空間通信における双方向配信は1対1のP-P (Point to Point) 接続システムが主流であるが, シンポジウムなど1つの会場からN個会場へ双方向に配信する際, P-Pの集積では, 2N台の光無線装置が必要となるためコストがかかり広い設置スペースも必要である。1対N (Point to Multi Point (P-MP)) の双方向通信が実現できればN+1台で配信が可能となるためコストが削減され省スペースとなる。本研究では, 近年, 著しく発展を遂げている光学デバイスを用いた時分割多元接続を提案し, その可能性について検証を行った。原理確認実験として, 光空間通信の時分割多元接続の実現可能な接続条件を求め, これを実現させるための光学デバイスの検討を行い, 実現の可能性を得たので報告する。

キーワード: 光空間通信, 時分割多元接続, 液晶空間光変調器

1. はじめに

ブロードバンドの大衆化, 携帯電話など移動体通信の急激な普及により, eラーニングを代表とするマルチメディアコンテンツの配信, テレビ会議システムや各種セミナー・遠隔講義など動画配信の需要が増えている。配信サービスの質の向上・要求に対し, 周波数資源のマイクロ波帯の逼迫は深刻な状況にあり, 新しい通信帯域として赤外光やミリ波などの大容量通信の見直しが始まっている。

赤外光を利用した屋外光空間通信は, 現在, 通信事業者の回線として利用される段には至っておらず, 利用範囲を拡大するための技術開発が求められている。中でも, 高速化 (大容量化), アイセーフ波長への移行¹⁾, 多元接続通信²⁾, 回線稼働率の信頼性の向上³⁾, 時間遅延の解消⁴⁾, 光ファイバ通信とのシームレス化⁵⁾の検討が行われており, 光通信などで培われた技術の適用による装置の高度化や, 周辺の光学デバイス技術の発展により, 改善の兆しが見られる。

屋外光空間通信は, 1対1 (Point to Point (P-P)) 接

続の双方向通信は実用化されているが, 双方向通信を可能としたP-MP接続については屋内・屋外ともに行われていない。特に光空間通信の特徴である“設置の容易さ”を活かした, インターネット回線のない会場からのシンポジウム配信や遠隔講義など, 同一の映像を複数の会場に配信することを想定すると1対N (Point to Multi Point (P-MP)) 接続は必須である。光の干渉性の少ない性質を利用することで, 電波に比べれば, 高い密度で集積することはできるが, 多数の会場へ配信する場合, P-Pの集積では, 装置の設置場所が大きくなり, 設置調整を含め, 空間的にもコスト的にも非効率である。配信先がN会場あった場合, P-Pの集積では2N台の装置が必要であるのに対し, 多元接続では, (N+1) 台で配信可能である。

本研究では, 近年, 画像処理, 光計測などの進歩と共に発展を遂げている光学デバイスを用いた時分割多元接続を提案し, その可能性について検証を行った。

2. 空間通信における多元接続

多元接続 (Multiple Access) とは, 複数の無線局が電波帯域を共有して情報を送ることであり, 電波帯域の有効活用のため, 組み合わせて使用されることが多い。

Contribution No.: MP 06-8

既に、マイクロ波帯域においては、符号分割、時分割、周波数分割、空間分割など、利用効率を高める方式として携帯電話や衛星通信などにおいて使用されている。

屋外空間通信の多元接続において、市販されている装置はそのまま、特別な受光器を必要とせずに実現できる方式は、時分割、空間分割だけである。また、屋外空間通信において、天候に依存した大気伝搬による光波減衰は避けられず、通信光量をロスすること無く活用することが望まれる。空間分割では、分割数が少ない場合は問題ないが、分割数の増加につれて1チャンネルの光量が減少するため、通信の確立が難しくなる。また、天候によって、分割数の条件が異なってしまう。一方、時分割方式は、時間的に通信先を分割し、複数地点へ配信を行うため、光量のロスが無く通信が可能である。

現在、時分割多元接続として、反射鏡を用いた方式が提案されている²⁾。これは、一つの地点から複数地点へ、ステッピングモータによって回転反射鏡の角度を制御し、光路を強制的に変化させることによって多元接続を可能としている。しかし、この手法は、ステッピングモータの静止角度の誤差による受信装置の中心地からずれが生じ、大きなミラーを機械的に動かすことによる設置スペースの確保が必要である。

そこで、我々は、近年目覚ましい進歩をとげている光

学デバイスを活用した時分割多元接続を提案する。Fig. 1 に提案時分割多元接続の概念図を示す。中心局となる光無線装置 A の前に光学デバイスを設置し、時間的に光波面の偏向方向を制御することによって、従属局の各々の光無線装置 B, C, D との通信に切り替えることができる。同様に、従属局から中心局への上り回線は逆方向を辿る。従って、中心局では光無線装置 B, C, D の各々と双方向通信が可能となる。光学デバイスを活用することにより、大きな駆動装置を必要とせず、角度制御の精度が高く、安定した時分割接続が実現できる。

3. 時分割通信の原理確認実験

光空間通信において、時分割通信が可能な接続切り替え時間を求めるための実証実験を行った。多元接続通信の際に、常に1つの従属局側と受信しているとし、オプティカルチョッパーを使用して光の透過 (ON) / 不透過 (OFF) 状態を作った。オプティカルチョッパーの ON / OFF を1周期と考えたとき、1周期のうち ON / OFF の比が 1 / 1 (Duty 比 50%) の場合が1対2接続、1 / 2 (Duty 比 33%) の場合が1対3接続、1 / 3 (Duty 比 25%) の場合が1対4接続を想定している。Fig. 2 に Duty 比の概念図を示す。これらの条件において、1周期の時間を変化させることによって、時分割通信が可能な条件を調べた。

原理確認実験で使用した光無線装置は、浜松ホトニクス社の PHOTOLINER シリーズ C9095-01 で、大気の影響を考慮する必要のない伝搬距離 95 [cm]、室内において実験を行った。Table 1 に光無線装置の仕様、Fig. 3 に実験光学系の写真を示す。通信可能かどうかの検証は、通信品質を表すスループットを測定した。今回は、ネットワーク性能測定ツールとして“iperf”、測定 PC は送受信共に Dell Inspiron 710m [インテル® Pentium® M プロセッサ 1.70 GHz, 256 MB RAM] を用いた。屋外光空間通信において最も需要が大きいシンポジウムや遠隔講義などのライブ映像配信は、DV によるストリーミング配信が主流のため、通信プロトコルは、UDP を用いて実験を行った。また、DV over IP を想定し、データ

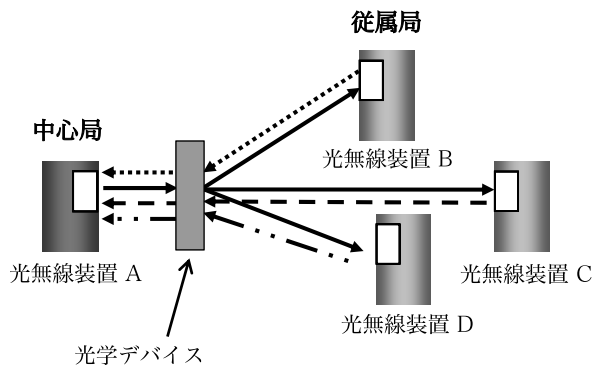


Fig. 1. Proposed time division multiple access method using optical device in optical space communication.

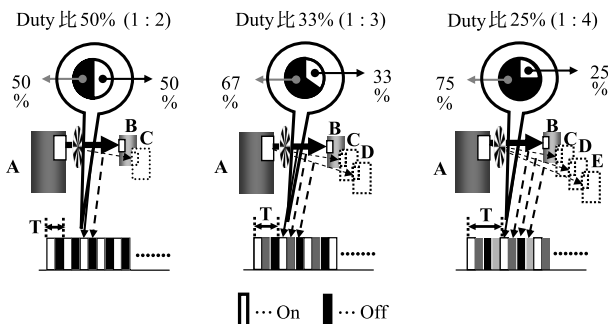


Fig. 2. Illustration of duty ratio.

Table 1. Specification of optical space communication equipment

| | |
|------|---------------------|
| 社名 | 浜松ホトニクス社 |
| 製品 | PHOTOLINER C9095-01 |
| 波長 | 780, 830 [nm] |
| 出力 | 10 mW |
| 通信速度 | 125 [Mbits/sec] |
| 検出器 | Si-APD |
| 通信距離 | 200 [m] |



Fig. 3. Experimental set up.

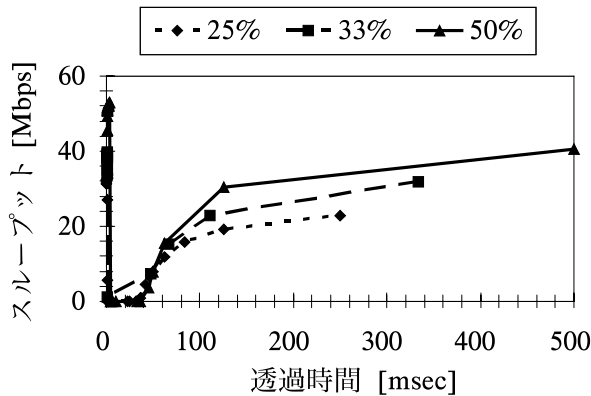


Fig. 4. Experimental results of throughputs on access-time (wide range).

ラムは 1470 [Byte] とし, 1 周期 T が 2-1000 [msec] の時, 1 秒間隔で計 100 秒間の連続通信でスループットの測定を行った。

Fig. 4 に帯域幅 100 [Mbps] の時の各 Duty 比の透過時間におけるスループットの実験結果を示す。透過時間が 100 [msec] 以上と 3 [msec] 以下で高いスループットを得ていることがわかる。2 領域で高いスループットが得られたが, 両者にどのような違いが現れるか Duty 比 50%, 透過時間 2.50 [msec] と 500 [msec] の条件で動画配信実験を行った。配信には, DV サーバーとして DV-CUBE (FA. システムエンジニアリング株式会社) を用い, IEC61834 (画像サイズ 720×480, フレームレート: 30 fps) で実験を行った。500 [msec] の時は透過時には問題なく映像配信ができるのに対し, 不透過時には映像がフリーズしてしまった。これは, 透過時間の 500 [msec] はデータグラムが十分送れる接続時間であったため, 高いスループットが得られたと考えられる。また, 透過時間 2.5 [msec] の場合は, 透過・不透過時において支障なく配信することができた。これは, 画像 1 フレーム以上を送るのに十分な透過時間であり, 不透過時間が人間の動画知覚速度よりも大変短いため, フリーズを知覚することなく, 配信できたと考えられる。以上の検証により, 正常に動画配信が行える多元接続可能な範囲は,

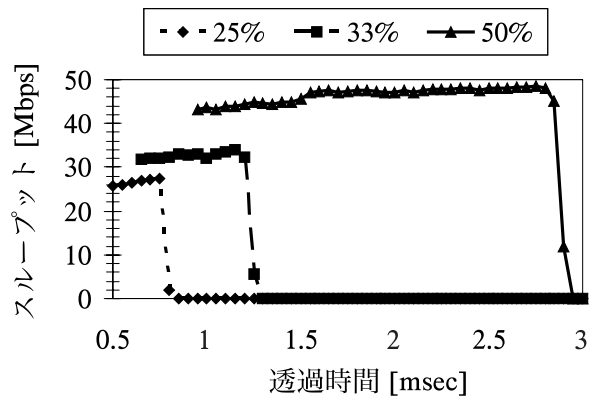


Fig. 5. Experimental results of throughputs on access-time (narrow range).

3 [msec] 以下であるといえる。

次に, 各 Duty 比における接続切り替え時間の検証を行うために, データグラムサイズ 1470 [Byte], 帯域幅 20, 40, 60, 80, 100 [Mbps], に条件を変化させた時のスループットを調べた。Fig. 5 に帯域幅 100 [Mbps] の時の各 Duty 比の透過時間におけるスループットの実験結果を示す。Duty 比 50%, 33%, 25%それぞれにおいて, 接続切り替え時間が 2.85 [msec], 1.20 [msec], 0.75 [msec] 以下で配信可能なスループットが得られていることがわかる。Duty 比 50%時に透過時間が測定可能な 1.00 [msec] まで通信が確立されているのは, 透過時間が 1 フレームのデータ通信を完了するのに十分な時間を有しているからだといえる。帯域幅 20, 40, 60, 80 [Mbps] においても, 接続切り替え時間は, 100 [Mbps] と同様の結果が得られた。これにより, 通信する回線網の通信帯域が異なっても, 同条件で時分割接続が可能であることがわかった。

これらの実験結果により, 光空間多元接続を実現させるには, 2.85 [msec] 以下の応答速度を有する光学デバイスを選択する必要がある。

4. 光学デバイスの検討

時分割可能な光学デバイスとして, 液晶空間光変調器, 音響光学素子, 光 MEMS (DMD), ピエゾ素子などが挙げられる。液晶空間光変調器と音響光学素子は, 格子ピッチの異なる回折格子を表示させ, 回折現象によって光波面を制御し, 光 MEMS (DMD) とピエゾ素子は, 鏡の角度で反射させて光波面を制御する手法が考えられる。ミラーの反射による手法では, ミラーの角度の制御が重要となり, 複数箇所での静止角度を設けることは, 光 MEMS (DMD) のような固定された角度にのみ対応する構造のものや, ピエゾ素子のような分解能は高いが広範囲に角度が振ることが難しいデバイスは, 汎用性に欠

ける。

したがって、今回は、回折現象によって光波面を制御する光デバイスを活用した時分割多元接続について検討を行う。

4.1. 応答速度（フレームレート）

3章の原理確認実験より、時分割多元接続を実現させるためには、2.85 [msec] 以下の応答速度を有する光学デバイスが必要であり、数 100 Hz～数 kHz のフレームレートが必要である。

4.2. 開口サイズ

光空間通信において、通信光量をロスすること無く活用することが望まれる。光無線装置からの出射光を包括する開口サイズの光デバイスであればよい。しかし、光無線装置の光源は LD であり、ガウシアン分布をとるため、全光強度の 8 割以上を含む半値幅の領域を包括する面積があれば十分である。本来ならば、LD の直後に透過型の光学デバイスを設置すればよいため、数 mm 角程度の開口を有すれば十分であるが、今回は原理確認実験のため、躯体からの出射直後の半値幅を調べた。その結果、半値幅は 32.8×11.6 [mm] となり、数 10 mm 角の光学デバイスが必要であることがわかった。

回折現象によって光波面を制御する光デバイスの代表的なものとして、液晶空間光変調器と音響光学素子が挙げられるが、以上の必要条件により、強誘電性液晶空間光変調器（FLC-SLM）が適しているといえる。

5. 液晶空間光変調器を用いた時分割多元接続の検証

デバイスの基本特性から、時分割多元接続を実現する光学デバイスとして強誘電性液晶空間光変調器（FLC-SLM）が挙げられたが、市販されている FLC-SLM のスペック⁶⁾を用いて実現可能であるか、否かの検証を行う。

5.1. 多元接続の角度範囲

FLC-SLM に回折格子を表示させ、回折現象により複数地点へ光波偏向を行う際、広範囲への偏向を実現させるためには、次式のグレーティング方程式からも明らかに、入射角一定のとき、格子ピッチが細かいほど回折角が大きくなる。

$$d (\sin \alpha \pm \sin \beta) = m \lambda \quad (1)$$

d : 格子ピッチ, α : 入射角, β : 回折角,

m : 次数, λ : 波長

市販されている FLC-SLM のピクセルサイズは 1.8 [μm]⁶⁾ であり、2 値の回折格子であれば、格子ピッチ

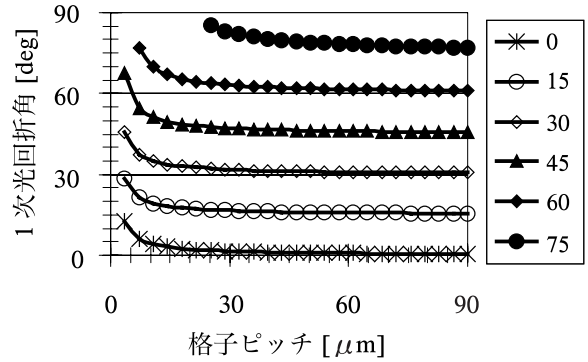


Fig. 6. Calculation results of 1st diffraction angle on grating pitch.

3.6 [μm] の倍数で回折格子の表示が可能となる。Fig. 6 に、波長 780 [nm] の光無線装置を中心局とし、FLC-SLM への入射角を 0～75 [deg] に変化させたときの、各格子ピッチにおける 1 次光回折角度を示す。

入射角度固定時の格子ピッチの変化による回折角の変化量は約 10～20 [deg] であるが、光空間通信は数 km 間の設置距離となり、回折角の変化量が 10 [deg] で 1 km 間の通信の場合、同半径なら、約 175 m 離れた地点の局まで接続が可能である。また、入射角度を調整することで、広範囲に設置された従属局との接続が可能であることが確認できる。

5.2. 光波減衰

光空間通信において、通信が確立できるかどうかは光強度に依存する。そこで、市販の FLC-SLM を用いて時分割多元接続を行う際に予想される光波減衰の計算を行った。透過型液晶空間光変調器を用いて通信する際に起こる光波減衰の要因として①大気伝搬による伝搬損失（視程依存）、②液晶による光の損失（振幅透過率）、③回折効率（振幅型）が挙げられる。

①の大気伝搬による光の伝搬損失は視程距離に依存している。減衰係数を β_e とし、強度 I_0 の光が x [cm] 伝搬したときの強度を I_x とすると

$$I_x = I_0 \exp(-\tau), \quad \tau = \beta_e x \quad (2)$$

となる。ただし、 τ : 光学的厚さである。

②の振幅透過率は以下の式から求めることができる。

$$t_p \equiv \frac{A_{tP}}{A_{iP}} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (3-1)$$

$$t_s \equiv \frac{A_{tS}}{A_{iS}} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (3-2)$$

このとき、 A : 振幅, θ_i : 入射角度, θ_t : 出射角度, n_i, n_t :

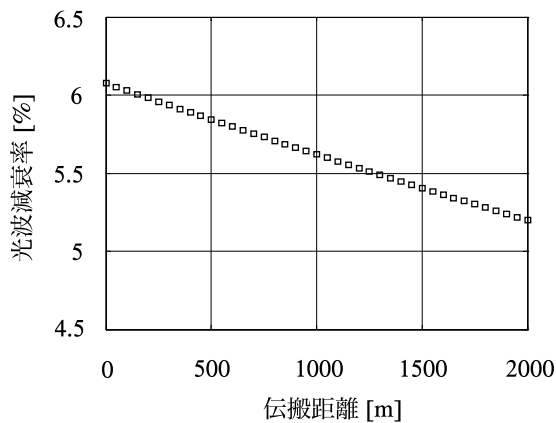


Fig. 7. Calculation results of reduction of optical power on transmission distance.

屈折率である。強誘電性液晶の長軸、短軸方向の屈折率は 1.50, 1.64 として計算を行った。

③の回折効率は振幅型の回折効率の理論値は10.1%である。

①, ②, ③を考慮して計算を行った光波減衰の結果を Fig. 7 に示す。計算でを使用した光無線装置は中距離型(通信距離 2,000 m)であり、受光素子の感度は、出射された光強度の 1.4%の光が入射すれば通信が可能である特性を持っている。したがって、Fig. 7 からわかるように、FLC-SLM による多元接続通信において生じる光波減衰は 5.2%以上であることから、2,000 m の伝搬距離において通信可能であるといえる。

6. ま と め

光空間通信において光学デバイスを用いた時分割多元接続を提案し、その可能性について検証を行った。原理確認実験として、光空間通信の時分割多元接続の実現可能な接続条件を求めるための実験を行った。これにより、

Duty 比 50%, 33%, 25%における接続切り替え時間が、それぞれ 2.85 [msec], 1.20 [msec], 0.75 [msec] 以下の時、回線網の帯域幅に関係なく高いスループットが得られ、時分割多元接続配信の実現の可能性を確認した。また、時分割多元接続の汎用性から、回折現象による波面制御方式で実現させるために、回折格子表示可能な光学デバイスの検討として、応答速度、開口サイズより、強誘電性液晶空間光変調器 (FLC-SLM) を選択した。さらに、市販の FLC-SLM を用いたときの、多元接続の角度範囲、光波減衰を検証し、伝搬距離 2,000 m において、実現可能であることを確認した。今後、FLC-SLM を用いた時分割多元接続配信の実証実験を行う。

謝 辞：本研究を行うにあたり、有益な議論を頂いた日本女子大学理学部・小館香椎子教授、早稲田大学大学院国際情報通信研究科・嶋本薫教授、また、装置を提供して下さい下さった早稲田大学理工学部・中島啓幾教授と浜松ホトニクス・若森和彦氏、に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) P. Benitez, J.C. Minano, F.J. Lopez, D. Biosca, R. Mohedano, M. Labrador, F. Munoz, K. Hirohashi, M. Sakai: *Proc. SPIE* **4873** 30-40 (2002).
- 2) 山 東 仁, 李 一, A. Chernov, 嶋 本 薫, 藤 川 知 栄 美, 小 館 香 椎 子: *信 学 技 報* **103**, 420, 25-35 (2003).
- 3) K. Shimizu, C. Fujikawa, Y. Ishii, M. Akiba, K. Wakamori, K. Kodate: *Proc. Of MOC '04* (2004).
- 4) 日 比 野 浩 三, 小 林 孝 行, 横 田 和 之, 中 島 啓 幾, 石 田 友 美, 清 水 賀 代: *電 子 情 報 通 信 学 会 総 合 大 会* (2006).
- 5) 有 本 好 徳, 若 森 和 彦, 鈴 木 敏 司, 松 本 充 司: *信 学 技 報*, **106**, 118, IN2006-23, 37-42 (2006).
- 6) <http://www.bnonlinear.com/products/linearPhase/linearPhase.htm>

Examination of Time Division Multiple Access Using Optical Device in Optical Space Communication

Kayo Ogawa and Tomomi Ishida
Department of Mathematical and Physics,
Faculty of Science, Japan Women's University

(Received January 31, 2007)

Abstract: The spread of the Internet and network using IP cause the structural shift of the communication. Moreover, the mobile telecommunications such as cellular phones have increased and the broad band also has generalized. As a result, the frequency resource that centers on the micro wave has been stringent. Recently, the outdoor optical space communication systems are revalued as a communication to supplement the lack of the electric wave resource, and then the use of optical space communication has extended gradually. The interactive communication on point-to-point (P-P; 1:1 connection) connection system has been put to practical use in the outdoor optical space communication at present. To transmit the image to N auditoriums at the same time by using the P-P connection method, $N \times 2$ optical space communication systems are needed. In the point-to-multi-point (P-MP) connection system, $N+1$ optical space communication system makes the transmission possible, and it leads to the cost reduction. In this research, we propose P-MP connection using optical device in an optical space communication system and examine it experimentally.

Key words: optical space communication, time division multiple access, liquid crystal special light modulator