



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	光空間通信のための光位相制御による高位相安定コヒーレント光合波システムの研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	原口, 英介
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13989号
Issue Date	2020-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/78126
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Eisuke_Haraguchi_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 原口 英介

学 位 論 文 題 名

光空間通信のための光位相制御による高位相安定コヒーレント光合波システムの研究
(Study on high phase stable coherent beam combining system by optical phase control for free space optical communication)

東日本大震災や令和元年の台風 19 号に代表されるように、我が国では他国に比べ地震、台風などの大規模自然災害が発生しやすく、災害監視や地球観測への利用など、人工衛星や航空機を用いた観測システムが重要な役割を担っている。近年、低軌道衛星に搭載される観測機器の高精細化に伴い、データ容量が急速に増大しており、衛星搭載のメモリ容量制限に近づいている。この問題解決の為、観測データを低軌道衛星から静止軌道衛星にデータ中継を行う高速衛星間通信 (1Gbps 以上) が求められている。しかしながら、従来の電波による通信 (数 100 Mbps) では周波数資源の枯渇が問題となり、さらなる高速化が困難な状況である為、小型、低消費電力で高速大容量伝送 (数 Gbps) が可能な光衛星間通信機器の実用化が求められている。また、地上においても有事の際の高秘匿性通信や、災害時に通信インフラが途絶した環境における臨時回線として、電波法の制限を受けず早期設置・撤収が可能な小型・軽量、高速大容量通信の実現手段として光空間通信機器の実用化が求められている。

光波はその広帯域性、高指向性といった特徴から、他の周波数帯の電磁波と比べ高速大容量、高秘匿性の長距離通信が期待できる。一方、空間を伝送する光空間通信においては、地上系の光ファイバ通信と異なり、伝搬中に光増幅器による損失補填ができない為、高出力な光増幅技術が求められる。さらには高指向性を有する光波を遠方 (衛星間通信では約 40,000km) の受信局側にて光を受信するために、空間的に μrad 程度の精度で対向させる高精度指向角制御技術が必要である。しかしながら、放射線環境下に通信機器が晒される光衛星間通信においては、耐放射線性の問題から高出力な光増幅器を用いることができず、また、従来の機械的な高速指向角制御では応答速度、信頼性に問題がある。レーザーの高出力化要求に対し、複数の小出力レーザーをコヒーレントに合波するコヒーレント合波技術は有効な手法である。特にタイル状に配置された複数のレーザー光をコヒーレントに合成する光フェーズドアレイは、各照射端での位相面を制御することで機械的な走査なく高信頼、高速、高精度に合成光の指向角を制御可能であり、光増幅技術と指向角制御技術の両者に対して有効な手法である。コヒーレント合波技術は、通信、リモートセンシング等の幅広い分野において音波からミリ波へと電磁波の適用領域を広げており、将来は周波数枯渇の課題から、より高い周波数 (THz 波、光波) での実現が望まれている。にもかかわらず、光波によるコヒーレント合波技術の開発は特定用途 (防衛) の連続光によるエネルギー伝送向けにとどまっている。その主な理由の一つとして、短波長性、高指向性といった特徴を有するレーザー光のコヒーレント合波では、マイクロ波帯と比べ、約 10,000 倍の精度で時間、空間領域で波面を揃える必要があることが挙げられる。a) その要求精度から、温度等の環境変動により生じる光位相変動は無視することができず、光位相を動的に制御する必要がある。素子数が増加した際の複数光位相の動的制御は、システムの巨大化につながり、実用的な構成、コストでの実現が困難である。さらに、b) コヒーレント光合波では、各素子に用いられる光増

幅器により無相関に光位相雑音の劣化が生じ、その光位相雑音を補償する必要があるが、通信信号が重畳された広帯域なスペクトル幅を有する複数のレーザー光に対する光キャリア位相の動的制御方法が確立されていない。

この2つの課題解決に向け、(1) 小型、且つスケーラブルに増設可能な高精度光波面検波・制御によるコヒーレント光合成、ならびに (2) 通信信号を付加した際のコヒーレント光合成における動的な光キャリア位相制御を行い、光空間通信の実証研究を行った。

(1) では、将来的に集積化が可能な光位相変調器を用いた高ダイナミックレンジ、高精度光位相制御による時間領域でのコヒーレント光合成技術と (1-1) 4 象限フォトダイオードを用いた複数光の光位相、及び指向角度同時検出技術を提案、実証し、空間領域でのコヒーレント光合成技術を確認した (1-2)。(1-1) では、光位相変調器に対し、鋸波形の変調を加えるセロダイン変調を用いた高位相安定位相制御技術を考案し、実証した。光位相変調器を用いた光位相制御では、光位相変調器の駆動ダイナミックレンジが課題となるが、本提案方式により、光位相変調器のダイナミックレンジに依存せず、位相同期精度 $\lambda/600$ の高位相安定な光位相同期を実証した。本技術は光位相同期に対してだけでなく、風計測ライダーなどのコヒーレント検波に基づくシステムに汎用的に適用可能であり、コヒーレントレーザーシステムの小型、軽量、低コスト化に寄与する技術である。(1-2) では、コヒーレント光合成における光位相、指向角度検出系の小型化に向け、複数光の高精度位相・指向角同時検出技術を提案、実証した。提案方式では合成光の各素子に異なる周波数の位相変調信号を重畳し、高速 4 象限フォトダイオードで受信する。受信後、周波数領域において各素子を識別し、空間領域の情報から各素子の指向角度情報を取得することができる。GHz 以上の帯域を有する高速 4 象限フォトダイオードを本方式に用いることにより、100 素子以上の光位相と指向角の同時検出を可能である。また、2 素子による実証実験において複数光の同時指向角度検出 (検出ダイナミックレンジ: $500 \mu\text{rad}$, 検出精度: $0.072 \mu\text{rad}$), 及び光位相同期 (同期精度: $\lambda/800$) を実証した。更に、本方式を用いた素子数増加に伴う合成効率劣化要因を明らかにし、100 素子合成時における合成効率劣化は 1 % 以下であることを示した。

(2) では、コヒーレント光合成技術に基づく光空間通信装置の実現に向け、同一周波数の複数光をコヒーレントに加算するコヒーレント光合成技術と、異なる波長の光を合成する光スペクトラム合成技術 (波長合成) を用いた新たな合成方式について提案、実証した。本方式はコヒーレント光合成の光位相制御を行うための基準光源と、通信信号を付加した送信光源とを光ファイバで合波し、位相誤差検出系では波長分離フィルタにより基準光のみを検出する。基準光と送信光とは光ファイバで合波されており、同軸光路を伝搬するため、同一の光位相変動を受ける。これに対し同一の光位相制御器により光位相制御を行うことで、複数波長のコヒーレント光合成を実現する。本方式を用いた、新たなコヒーレント光合成技術に基づく光空間通信装置を試作し、2 波長多重による 5.6 Gbps の光空間通信を実証した。我々の知る限り、通信信号を付加したコヒーレント光合成による光空間通信の報告はない。本方式は、波長合成数を増加することにより、スケーラブルに光パワー、及び通信レートを増設可能である。

上記、本研究成果 (1),(2) により、高安定、高出力なコヒーレント光空間通信装置が実現でき、衛星間光通信や高秘匿性通信だけでなく、今後需要が高まる移動体無線通信ネットワークを支える技術として期待できる。