UAV 기반 FSO 무선통신 네트워크 기술 동향

Recent R&D Trends in Wireless Network Technology based on UAV-assisted FSO Technique

여찬일 (C.I. Yeo, ciyeo@etri.re.kr) 광ICT융합연구실 선임연구원
허영순 (Y.S. Heo, ysheo@etri.re.kr) 광ICT융합연구실 책임연구원
류지형 (J.H. Ryu, jihyoung@etri.re.kr) 광ICT융합연구실 선임연구원
박시웅 (S.W. Park, swp@etri.re.kr) 광ICT융합연구실 연구원
김성창 (S.C. Kim, sungchang@etri.re.kr) 엣지컴퓨팅응용서비스연구실 책임연구원/실장
강현서 (H.S. Kang, hskang87@etri.re.kr) 광ICT융합연구실 책임연구원/실장
이길행 (G.H. Lee, ghlee@etri.re.kr) 호남권연구센터 책임연구원/센터장

ABSTRACT

In recent years, the unmanned aerial vehicle (UAV) assisted mobile free space optical (FSO) communication technique has attracted considerable attention regarding its aims to provide improved communication conditions for fixed-to-fixed FSO network and promising fronthaul and backhaul solutions for 5G+ wireless networks. This can be attributed to its outstanding advantages such as fast deployment and flexible network configuration. The UAV-assisted mobile FSO system can be used to provide cost-effective internet services in rural and remote areas and in hotspot areas that are characterized by increased data traffic. Additionally, it can be used to provide secure communication services under emergency circumstances. In this report, we review recent R&D trends in wireless network technology employing the UAV-assisted mobile FSO technique and key technologies for mobile FSO wireless networks. Furthermore, we introduce drone-based mobile FSO terminals and control systems that we have developed.

KEYWORDS FSO(Free Space Optical), UAV(Unmanned Aerial Vehicle), Wireless network

Ⅰ. 서론

최근 다양한 모바일 기기의 급속한 증가로 무선 데이터 사용량이 폭발적으로 증가하고 있으며, 통신속도 향상에 대한 수요도 지속해서 늘어나고 있다. 아울러 인공지능(AI: Artificial Intelligence), 가상현실(VR: Virtual Reality) 및 사물인터넷(IoT: Internet of Things) 서비스 제공을 위한 목적으로 고

* DOI: https://doi.org/10.22648/ETRI.2020.J.350204
* 본고는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 ETRI 출연금사업의 일환으로 수행된 연구임[20ZK1120, 극한환경하 특수목적 광무선 전송 및 분석 핵심기술 개발].

본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.
©2020 한국전자통신연구원

속·대용량 데이터 전송을 위한 5G+ 무선통신기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 기존 RF(Radio Frequency) 기술 기반 무선통신 방식은 스펙트럼 부족 현상과 주파수 혼잡 문제가 점점 심각해지는 추세로 보완기술의 필요성이 증가하고 있다. 최근 들어 빠르게 증가하는 무선통신 트래픽 수요에 대응하고, 대용량 데이터를 효율적으로 전송하기 위해 1) 비면허대역, 2) 초광대역, 3) 전자기장 간섭 무관, 4) 지향성 통신, 5) 장거리 전송(~수십 km), 6) 가시선(LOS: Line of Sight) 기반 보안통신 등의 특성을 갖는 자유공간 광전송(FSO: Free Space Optical) 기술에 대한 관심이 높아지고 있다[1,2].

특히 이동성(Mobility)을 갖는 무인항공기(UAV: Unmanned Aerial Vehicle) 기술의 발전과 성숙으로 이를 활용한 모바일(Mobile) FSO 통신기술은 일시적 트래픽 증가로 인해 기존 통신 인프라를 통한 트래픽 공급이 원활하지 못한 공연장, 경기장, 회의장, 다중이용시설 등 핫스팟(Hot spot) 지역과 교통혼잡이 심각한 도로 및 재난·재해 발생으로 긴급 통신망 복구가 필요한 상황 등에 신속하고 유연하며 경제적인 방법으로 무선통신 서비스를 제공하기 위해 활용 가능하다[3–9]. 일반적으로 UAV를 활용한 무선통신망 복구 방법은 기존의 인공위성 인프라를 활용하는 방법 대비 적용이 용이하고, 저비용 및 저지연 등의 장점이 있다[8]. UAV의 기동성을 활용한 UAV 기반 모바일 FSO 통신기술은 전통적인 고정점(Fixed–to–Fixed) 간 FSO 통신방식의 주요 성능저하 요인인 대기환경(안개, 구름, 에어로졸 등) 및 장애물에 의한 통신장애 문제와 통신거리 증가에 따른 광손실 증가 문제를 효과적으로 해결함으로써 통신품질 개선이 가능하다[1,6,10].

최근 지상의 스몰셀(Small cell) 무선 접속 기지국과 이동통신 코어 네트워크(Core network) 연결을 위한 무선 프론트홀(Fronthaul)/백홀(Backhaul) 솔루션 기술로 UAV를 활용한 모바일 FSO 무선통신 네트워크 기술 관련 연구들이 활발히 진행되고 있으며, 활용 가능성이 점점 높아지고 있는 추세이다[7–9]. 모바일 FSO 무선통신 네트워크 구축을 위해 활용 가능한 UAV 플랫폼에는 대표적으로 드론(Drone)과 열기구(Balloon)가 있으며, 드론은 비행고도(Cruising altitude), 탑재중량(Payload), 비행시간(Endurance), 순항거리(Cruising range), 날개 구성(Wing configuration) 등에 따라 다양하게 분류가 가능하다[7,8].

앞서 설명한 바와 같이 FSO 무선통신 네트워크 기술은 UAV와 협업을 통해 향후 스몰셀이 밀집된 환경에서 무선통신 네트워크의 프론트홀/백홀 솔루션을 제공하고 이를 통해 네트워크 용량 증대를 위한 목적으로 빠르게 발전할 것으로 전망된다. 나아가 광섬유(Optical fiber) 또는 구리 케이블(Copper cable) 설치가 어렵고, 인터넷 연결성(Connectivity)이 부족한 지역에 무선통신 서비스를 제공하기 위해 활용될 것으로 기대된다[11,12].

본 고에서는 최근 UAV 기반 FSO 통신기술을 활용한 무선통신 네트워크 연구동향과 이를 구현하기 위한 핵심요소기술에 대해 설명하고, ETRI에서 진행 중인 UAV 기반 모바일 FSO 연구개발 내용과 향후 발전방향에 대해 간략히 소개하고자 한다.

Ⅱ. UAV 기반 FSO 무선통신 네트워크 개요

UAV 기반 FSO 모바일 무선통신 네트워크 주요 구성요소에는 FSO 통신장비 탑재 및 비행 임무수행을 위한 UAV와 지상–UAV 또는 UAV–UAV 간 광무선 데이터 송수신을 위한 FSO 터미널(Terminal) 및 FSO 기반 무선통신 네트워크와 지상 유선 네트워크를 연결하기 위한 FSO 게이트웨이(Gate–

way) 또는 지상관제시스템(GCS: Ground Control System)이 있다.

UAV는 비행체 프레임, 동력원, 비행제어(FC: Flight Controller) 시스템 및 임무장비 탑재를 위한 김벌(Gimbal) 등으로 구성되며, FSO 터미널은 광 송신부와 수신부 및 UAV 정밀 추적(PAT: Pointing, Acquisition, Tracking)과 FSO 터미널 간 LOS 링크 구축을 위한 비콘(Beacon) 시스템으로 구성된다. FSO 게이트웨이 또는 GCS에는 FSO 무선통신 네트워크로부터 수신한 무선 데이터를 베이스밴드 데이터 처리 장치(BBU: Base Band Unit) 및 코어 네트워크에 연결하기 위한 광 송수신 시스템을 포함하여 GPS(Global Position System), 위치인식 센서(Position sensor), 이미징 장치(Imaging device) 및 통합 제어시스템 등으로 구성된 별도의 PAT 시스템이 포함된다.

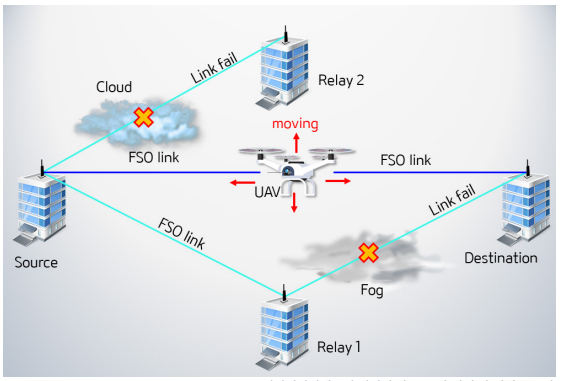
UAV 기반 모바일 FSO 무선통신 네트워크 기술은 기존의 고정형(Fixed) FSO 무선통신 시스템과 차별되게 UAV 형태, 탑재중량, 배터리 용량, 소비전력, 비행시간 등 UAV 스펙을 종합적으로 고려한 시스템 설계 및 동적 트래픽 최적 관리 등에 대한 연구가 추가적으로 필요하다. 또한 데이터 송·수신 및 PAT에 사용되는 FSO 터미널은 UAV 탑재가 가능하도록 소형화·경량화·저전력화가 필요하며, 넓은 송신각(Divergence angle)과 수신각(Acceptance angle) 및 장거리·고속 전송이 가능하도록 시스템 설계가 요구된다. UAV는 안정적인 FSO 무선통신이 가능하도록 비행 안정성과 김벌 제어 성능이 우수해야 한다. 추가적으로 스몰셀 간 효율적 트래픽 수요 관리를 위해 UAV 비행경로 제어 및 모바일 FSO 무선통신 네트워크 토폴로지 구성 최적화를 위한 연구가 필요하다. 끝으로 UAV 기반 모바일 FSO 무선통신기술의 현장활용을 위해 연구개발 단계에서 보안, 안전, 규제사항 등에 대한 고려가 요구된다. Ⅲ장과 Ⅳ장에서는 최근 진행 중인 UAV 기반 모바일 FSO 무선통신 네트워크 연구 동향을 소개하고 핵심 요소기술에 대해 자세히 살펴보고자 한다.

Ⅲ. UAV 기반 FSO 무선통신 네트워크 연구동향

1. UAV 기반 고정점 간 중계형 FSO 네트워크

고정점 간 FSO 무선통신 및 네트워크에서 대기상태 악화, 전송경로 가려짐(Fading), 전송거리 증가에 의한 BER(Bit Error Rate) 증가 문제와 FSO 링크 충돌 문제 등을 해결함으로써 네트워크 성능을 향상시키기 위한 목적으로 그림 1과 같이 고정된 신호원(Source)과 목적지(Destination) FSO 터미널 사이에 저장 기능을 갖는 FSO 터미널을 탑재한 UAV를 활용한 고정점 간 중계형(Relay-assisted) FSO 네트워크 모델이 최근 제안되었다[6].

본 기술은 기존 고정점 간 FSO 무선통신 네트워크 대비 UAV의 이동성을 활용함으로써 네트워크 구성의 유연성이 높고, 우수한 통신품질을 안정적으로 제공 가능한 장점이 있다. 이는 네트워크 통신품질이 가장 작은 경로 이득(Path gain)을 갖는 전



*게티이미지뱅크의 이미지 사용, 무단 전재 및 재배포 금지

그림 1 UAV 기반 고정점 간 중계형 FSO 네트워크 구성도

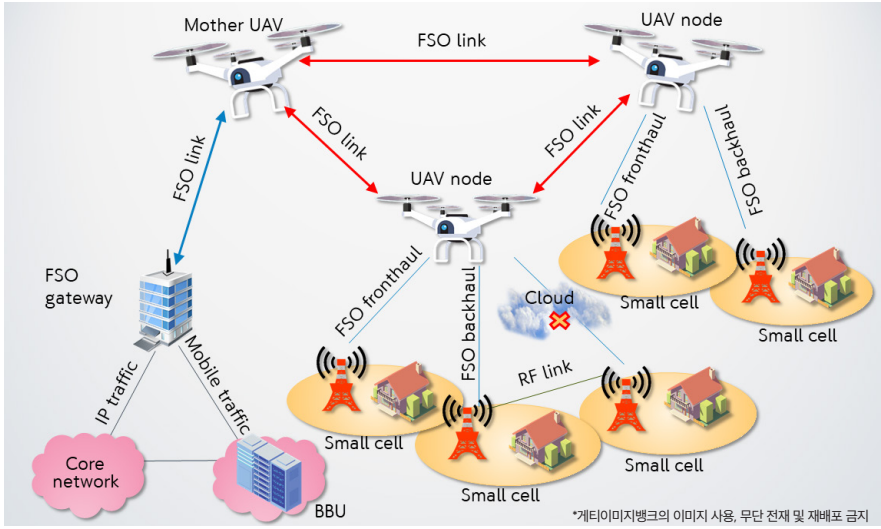


그림 2 UAV 기반 FSO 프론트홀/백홀 활용 5G+ 무선통신 네트워크 구성도

송 경로에 의해 결정되는 중계형 FSO 네트워크의 성능을 UAV 중계기의 위치 조절 및 비행경로 제어를 통해 효과적으로 높일 수 있기 때문이다. 또한 대기상태 변화 및 장애물 등에 의한 신호 감쇠 문제를 UAV의 이동성을 통해 효율적으로 해결할 수 있다. 결론적으로 UAV 기반 중계형 모바일 FSO 무선통신 네트워크는 UAV 이동성 활용을 통해 고정된 신호원-목적지 간 데이터 전송 성공률을 높이고, 데이터 처리량(Data throughput)을 증가시킬 수 있다. 아울러 중계기 역할을 수행하는 UAV 숫자 추가 및 UAV-UAV 간 FSO 통신(Inter-UAV FSO communication) 기능 추가를 통해 전체 무선통신 네트워크 규모 확대 및 성능 향상이 가능하다.

2. UAV 기반 FSO 프론트홀/백홀 솔루션 활용 5G+ 무선통신 네트워크

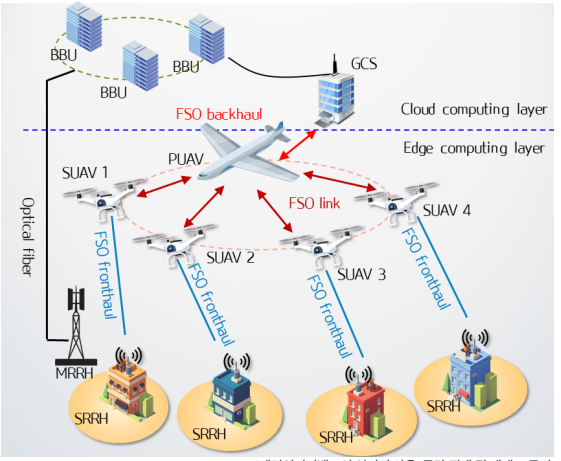
프론트홀/백홀 링크는 구리 케이블 및 광섬유 기반 유선 네트워크 방식과 무선 네트워크 방식이 있다. 일반적으로 유선 네트워크는 안정적이고 우수한 링크 품질특성을 갖는 장점이 있으나, 스몰셀용 구리 케이블 및 광섬유 매설 비용이 매우 높고 설치 시간이 오래 걸리는 문제가 있어 활용이 제한적이다[13]. 반면에 무선 프론트홀/백홀 네트워크는 설치가 용이하여 비용이 저렴하며, 신속하고 유연한 네트워크 구성이 가능하여 효율적이다. 최근 매우 주목받고 있는 5G+ 무선통신 네트워크에 활용 가능한 프론트홀/백홀 솔루션 기술로 UAV와 FSO 기술을 접목한 모바일 무선통신 기술에 대한 연구가 수행되고 있다[7]. 현재의 프론트홀/백홀 솔루션 기술은 대부분 스몰셀의 트래픽을 중앙 집합 지점(Aggregation point)으로 전달하는 방법을 기반으로 한다. 그러나 최적의 중앙 집합 지점 선정과 이를 배치하는 문제는 비결정론적 완전문제(Non-deterministic polynomial complete problem)로 해답을 찾는 것이 매우 어렵다. 이동 가능한 UAV를 활용한 FSO 통신기술은 실시간 네트워크 트래픽 변화 및 다양한 통신 요구사항에 신속한 대응이 가능하여 5G+ 무선통신 네트워크 스몰셀에 적절한 프론트홀/백홀 솔루션을 제공할 수 있는 새로운 패러다임의 접근 방식이다. 특히 본 기술은 스몰셀이 극도로 밀집된 환경에서 높은 데이터 전송

속도를 제공하는 데 적합한 솔루션이 될 수 있다.

그림 2와 같이 UAV와 수직(Vertical) FSO 무선통신 링크를 구축한 지상의 스몰셀은 사전 계획된 UAV와 FSO 링크를 통해 양방향 트래픽 전송과 데이터 송수신이 가능하다. 반면에 UAV와 FSO 무선통신 링크가 구축되지 않은 스몰셀은 UAV와 FSO 링크가 구축된 인접 스몰셀을 통해 UAV와 연결 가능하다. 본 기술에서 UAV의 고도와 위치는 높이 증가에 따른 네트워크 영역(Network coverage) 확대 및 광손실(Geometric loss) 증가로 인한 통신속도 저하 문제와 비행 위치에 따른 날씨 영향 및 음영지역(Shadow area) 최소화 이슈를 고려하여 최적 지점을 찾는 것이 필요하다. 아울러 본 기술의 효율적인 활용을 위해 UAV에 탑재 가능한 FSO 터미널 숫자 및 동시에 연결 가능한 링크 숫자 등을 종합적으로 고려한 스몰셀–UAV 간 FSO 프론트홀/백홀 링크 최적화 알고리즘 및 시스템 설계에 대한 연구가 추가로 요구된다.

3. 엣지 컴퓨팅 기술 기반 모바일 FSO 무선통신 네트워크

최근 엣지 컴퓨팅 기술을 활용하여 UAV 기반 모바일 FSO 무선통신 네트워크 시스템을 효율적으로 운용하기 위한 기술이 연구되고 있다[8]. 본 연구에서 엣지 컴퓨팅 기술은 UAV의 탑재중량, 비행시간, 이동성 및 운용상황 등을 종합적으로 고려하여 신속하고 효율적으로 통신자원관리(Communication resource management)를 수행하기 위한 목적으로 사용되었다. 엣지 컴퓨팅 기술 기반 모바일 FSO 무선통신 네트워크 시스템은 기존에 GCS에서 대부분 수행하던 연산과정과 시스템 제어 기능의 일부를 UAV에 탑재된 FSO 터미널과 캐시 미디어(Caching media)를 활용하여 모바일 FSO 무선



*게티이미지뱅크의 이미지 사용, 무단 전재 및 재배포 금지

그림 3 엣지 컴퓨팅 기술을 활용한 모바일 FSO 무선통신 네트워크 구성도

통신 네트워크의 엣지 컴퓨팅 층(Edge computing layer)에서 수행하도록 함으로써, GCS를 거치지 않고 모바일 FSO 무선통신 네트워크가 신속하고 안정적으로 운용될 수 있도록 하는 장점이 있다.

그림 3과 같이 엣지 컴퓨팅 기술 기반 모바일 FSO 무선통신 네트워크에서 엣지 컴퓨팅 층은 하나의 프라이머리 UAV(PUAV: Primary UAV)와 다수의 세컨더리 UAV(SUAV: Secondary UAV) 및 마이크로 원격 무선 장비(MRRH: Macro Remote Radio Head)와 스몰셀 무선 장비(SRRH: Small Remote Radio Head)로 구성된다. 엣지 컴퓨팅 기술 기반 모바일 FSO 무선통신 네트워크에서 PUAV가 활용되는 경우, 각 SUAV는 PUAV와의 FSO 링크를 통해 클라우드 컴퓨팅 층(Cloud computing layer)의 GCS와 연결된다. 반면에 PUAV가 활용되지 않는 경우, 각 SUAV는 GCS와 직접 FSO 백홀 링크를 구축하고, MRRH와 SRRH는 각각 광섬유 및 UAV 기반 FSO 프론트홀/백홀 링크를 통해 클라우드 컴퓨팅 층과 연결된다.

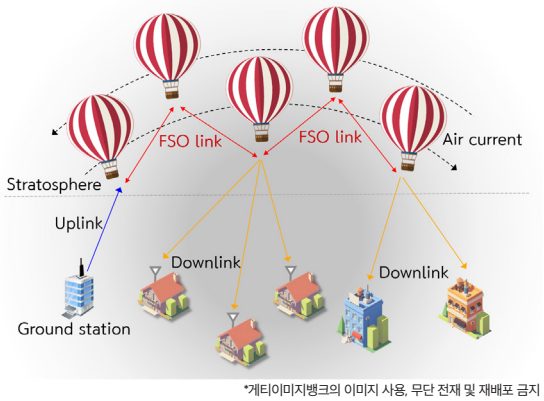
SUAV의 이동성은 심각한 시그널 오버헤드(Signal overhead), 전송 방해(Transmission disruption) 및

지연 증가(Increased latency)의 원인이 되는 핸드오버(Handover)를 빈번하게 발생시킨다. 본 연구에서는 빈번한 핸드오버 현상에 의한 모바일 FSO 무선통신 네트워크 성능 저하문제를 해결하기 위해 엣지 컴퓨팅 층 내 SRRH에서 SUAV로부터 수신한 FSO 신호의 세기가 사전에 정의한 문턱값(Predefined threshold)보다 낮을 경우, SRRH가 다른 SUAV를 찾는 프로세스를 능동적으로 수행하도록 시스템 운영체계를 구성하였다. 이때 SRRH는 인접한 위치에서 비행하는 SUAV에 탑재된 비콘 시스템을 활용하여 다른 SUAV들로 핸드오버 요청신호를 보내고, 핸드오버 신호를 수신한 각 SUAV는 SRRH의 요청에 대해 비콘 시스템을 활용하여 응답하는 프로세스를 수행한다. 최종적으로 SRRH는 가장 높은 비콘 신호를 송신한 SUAV와 새롭게 FSO 링크를 연결함으로써 전체 네트워크가 안정적으로 운용될 수 있도록 한다. 만약 SRRH가 필요한 정보를 보유한 SUAV가 없는 경우, 엣지 컴퓨팅 층 내부에서는 휴리스틱 방법(Heuristic method)을 통해 필요한 정보를 GCS에서 PUAV를 거쳐 SUAV를 통해 SRRH로 가져오는 프로세스를 수행한다. 앞으로 엣지 컴퓨팅 기술 기반 모바일 FSO 무선통신 네트워크의 추가적인 시스템 성능 향상을 위해 무선통신 상황을 고려한 SUAV 비행반경 최적화 및 지능형 캐싱(Intelligent caching) 전략에 대한 연구가 필요하다.

4. 성층권 열기구 기반 FSO 무선통신네트워크

Google에서는 성층권(Stratosphere)에서 비행하는 고고도 열기구를 활용한 FSO 무선통신 네트워크 구축과 이를 활용한 4G LTE(Long Term Evolution) 급 지상 무선통신 서비스 제공을 위한 목적으로 Project Loon을 진행하고 있다[11,14]. 성층권은 날씨 변화가 일어나는 고도 이상의 높이로 지상보다 대기 난기류(Turbulence) 현상이 매우 약하여 FSO 통신에 적합한 환경을 제공한다. 아울러 열기구를 활용한 FSO 무선통신은 프로펠러 기반 비행 플랫폼(Flying platform) 대비 진동에 의한 영향이 미미하며, PAT 과정이 용이한 장점이 있다.

Project Loon을 통한 무선통신 서비스 시나리오는 그림 4와 같다. 먼저 인터넷과 연결된 지상 스테이션(Ground station)에서 성층권의 열기구로 RF 통신을 활용하여 데이터를 업링크(Uplink)하고, 열기구로 전달된 데이터는 열기구 간(Inter-Balloon) FSO 네트워크를 통한 전파 과정을 거쳐 최종적으로 지상의 사용자 통신장비로 RF 통신을 통해 다운링크(Downlink) 된다. 업링크 및 다운링크를 위해 사용된 RF 스펙트럼은 ISM(Industrial, Scientific and Medical) 용도의 비면허대역이 활용되었으며, 열기구 간 FSO 무선통신에는 서로 다른 두 개의 적외선 대역 통신파장(1,550.12nm, 1,565.50nm)이 사용되었다. 고정밀 PAT 및 LOS 링크 구축에는 정밀 위치추적시스템(DGPS: Differential GPS)과 미세전자기계시스템(MEMS: Microelectro-mechanical System) 기반 관성측정장치(IMU: Inertial Measurement Unit) 및 별도의 광각(Wide angle) 비콘 시스



*게티이미지뱅크의 이미지 사용, 무단 전재 및 재배포 금지

그림 4 성층권 열기구 기반 FSO 무선통신 네트워크 구성도

템이 사용되었다. 열기구 기반 성층권 FSO 무선통신기술은 약 20km 고도에서 3~107km 떨어진 두 열기구 간 130Mbps 속도로 양방향(Full-duplex) 통신이 가능한 수준까지 개발이 완료되었다. 본 결과는 최초의 성층권 열기구 간 FSO 무선통신 시스템 구현이라는 점에서 의미가 있다. Project Loon을 통해 개발된 FSO 터미널의 무게는 6.3kg 수준이며, 전원공급 장치, GPS 시스템 및 항공전자시스템(Avionics system)을 포함한 전체 열기구의 비행 중량은 28.5kg 수준이다. 성층권을 비행하는 열기구는 최대 100km/hr 속도의 성층권 기류(Air current)의 영향으로 이동하고, 공기 펌프를 활용한 높이 제어를 통해 고도에 따라 계층화된 성층권 바람층(Wind layer)을 활용하여 원하는 방향과 위치로 이동한다. 본 연구에서는 성층권 바람에 의해 열기구가 계속적으로 이동해도 특정 영역에 연속적인 통신 네트워크 서비스가 가능하도록 유지하는 지상 중앙임무관리 시스템(Centralized mission control system)을 개발하였다. 지상 중앙임무관리 시스템에서는 지구 바람 모델(Global wind model) 예측 결과와 Cellphone tower handoff 표준 프로토콜을 바탕으로 개별 열기구의 고도를 통제하여 다른 곳으로 이동한 열기구의 자리와 임무를 이미 스케줄된 열기구가 대체하도록 함으로써 네트워크 연결성이 유지되도록 전체 열기구의 이동경로와 위치를 제어한다. 성층권에서 비행하는 열기구는 태양 전지판과 배터리를 활용하여 100일 이상 운용이 가능하며, 평균 20W 전력을 소모하는 것으로 알려져 있다.

Ⅳ. UAV 기반 FSO 무선통신 네트워크 핵심 요소기술

1. UAV Capacity

UAV를 활용한 FSO 무선통신 네트워크 구현에 있어 네트워크의 구성과 특성에 따라 상호 밀접한 연관성이 있는 UAV 탑재중량, 전력공급원, 배터리 용량, 기체 크기, 비행시간 등 UAV 용량(Capacity)과 관련된 요소들에 우선순위를 사전에 설정하여 세부 스펙을 결정하는 것이 매우 중요하다.

먼저 탑재중량은 FSO 광학시스템을 포함한 PAT 장비와 항공전자시스템 및 배터리 무게 등에 의해 결정되며, UAV 형태(고정익 또는 회전익)와 기체 크기 및 비행시간 등에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 전력공급원은 비행임무 수행 및 FSO 무선통신에 소모되는 전력을 공급하기 위해 필요한 요소로 내연기관, 배터리, 태양광 발전 등이 활용되며, 최근에는 수소연료전지를 활용한 전력공급 및 임무시간 향상을 위한 연구와 상용화가 활발히 진행되고 있다[15]. UAV 기체 크기는 탑재중량, 비행고도, 비행시간, 비행거리 등에 따라 결정되며, UAV 비행시간은 UAV의 순항거리 및 임무수행 범위와 밀접한 관계를 가질 뿐만 아니라 FSO 무선통신 네트워크의 구성과 운영에도 높은 연관성을 갖는다. 따라서 제한된 비행시간 향상을 통한 모바일 FSO 무선통신 네트워크 운영시간 증가를 위해 비행제어 및 비행체 설계 최적화, FSO 무선통신 임무 효율화, 대용량 전력공급원 개발 등을 위한 다양한 연구개발이 필요하다.

2. UAV Mobility

UAV 기반 FSO 무선통신 네트워크는 기존 고정점 간 FSO 네트워크 대비 UAV의 이동성 활용을 통해 네트워크 구성의 유연성과 활용도를 크게 높일 수 있으며, UAV의 고도, 위치 및 비행경로 제어를 통해 국지적 통신환경 악화, 장애물 및 통신거리 증가 등으로 인한 통신 품질저하 문제를 효율

적으로 관리할 수 있다. 그러나 UAV의 이동성은 불가피하게 FSO 무선통신 네트워크 안정성에 영향을 미치게 되므로, 네트워크 안정성 향상을 위한 연구가 필요하다.

UAV 기반 모바일 FSO 무선통신 네트워크를 안정적으로 구축하고 운영하기 위해서는 UAV에 탑재된 FSO 터미널의 흔들림을 최소화하고, FSO 터미널 간 LOS 광정렬을 강건하게 구축하기 위한 노력이 필요하다. FSO 터미널의 흔들림은 광송신 신호의 도착지점 이동(Shift in target position)을 초래하고, 이는 FSO 터미널 간 LOS 링크 단절 및 통신두절 결과를 불러온다. 이러한 문제는 전송거리가 증가할수록 심각해진다. 비록 FSO 터미널을 UAV에 탑재하기 위해 사용하는 김벌 시스템이 UAV에 의한 흔들림을 보상하여 항상성을 유지하는 데 도움을 줄 수 있지만, 순간적인 UAV의 가속과 감속에 의한 관성 및 김벌 제어동작 수행을 위해 소요되는 시간지연 문제는 반드시 해결해야 할 이슈들이다. 이를 위해 UAV의 비행계획 및 자세 등을 고려하여 신속한 김벌 제어가 가능하도록 UAV/김벌 상태 모니터링 및 제어시스템을 고도화하는 연구가 필요하다. 아울러 UAV 이동과 떨림에도 FSO 터미널 간 LOS 구축과 유지가 용이하도록 광송신 신호의 도착지점에서 비콘 및 데이터 빔이 넓은 공간영역(Spatial coverage)을 갖도록 통신거리에 따라 광신호의 세기와 분포를 효율적으로 관리하는 기술이 요구된다.

3. FSO Terminal

UAV 기반 FSO 무선통신 네트워크 구현에 있어 FSO 터미널 소형화·경량화는 UAV 기체 소형화 및 운용 부담 경감을 위해 선제적으로 결정해야 하는 매우 중요한 요소이다. 많은 연구에서 UAV 탑재중량 및 소비전력 감소와 LOS 정렬 문제해결을 위한 목적으로 Modulated Retro-reflector(MRR) 기반 FSO 터미널이 활용되어 왔다. 그러나 MRR 기반 기술의 제한된 변조(Modulation) 속도 및 통신거리 증가로 인한 송신 에너지 급증 문제는 양방향 고속 FSO 무선통신 네트워크 구현에 적합하지 않다[3,16]. 안정적인 양방향 고속 FSO 무선통신 네트워크 구현을 위해서는 고속 FSO 통신이 가능한 광 송수신기(Optical transceiver)와 정밀 비콘 시스템이 각 FSO 터미널에 집적되어야 한다.

FSO 터미널 소형화·경량화에 있어 광수신부 렌즈 직경(Aperture diameter) 축소는 전체 광학시스템의 크기와 무게를 줄일 수 있어 효과적인 방법이지만, 지나친 렌즈 직경 축소는 광 검출기(Photodetector)에 도달하는 수신 에너지 감소 및 통신성능 저하의 원인이 될 수 있다. 따라서 FSO 터미널의 크기 및 무게와 광학 및 통신 성능 간 상충관계(Trade-off)를 고려한 FSO 광학시스템 최적화가 요구된다. 또한 FSO 터미널은 움직이는 UAV를 추적하고 안정적으로 LOS 링크를 구축 및 유지하기 위해 전송거리와 통신환경 및 최소 광수신 파워 요구사항 등을 종합적으로 고려하여 최대한 넓은 공간영역을 갖도록 발산각 제어가 가능한 기능이 필요하다. 추가적으로 FSO 터미널 내부 스테이지 위치 조절에 따른 전송 빔 이동(Displacement) 현상이 발생하지 않도록 광학축(Optical axis)과 기계축(Mechanical axis)을 정밀하게 정렬할 필요가 있다.

끝으로 FSO 광전송은 날씨 조건과 대기 상태에 따라 흡수, 산란, 회절 등에 의한 광신호 손실과 왜곡이 발생할 수 있으므로 통신환경에 민감하지 않은 파장대역의 광원을 활용하는 것이 필요하다. 이러한 이유로 투명대(Transmission) 영역에 속하는 파장이 FSO 광전송에 적합하며, eye safety 이슈

가 적고 상용 광통신 제품 활용이 용이한 1,550nm 대역의 파장이 FSO 광전송에 주로 사용되고 있다[10].

4. PAT Technology

PAT 기술은 UAV를 이용한 FSO 무선통신 네트워크 구현을 위해 가장 중요한 핵심요소기술로 높은 기술력과 시스템 완성도가 요구된다. 일반적으로 PAT 프로세스는 여러 단계로 구성되며 가장 먼저 대략적인 UAV 위치추적을 위해 GPS 또는 실시간 이동 측위 위치 정보시스템(RTK-GPS: Real Time Kinematic-GPS)이 사용된다. 정밀한 UAV 추적 및 FSO 터미널 간 LOS 구축을 위한 PAT 단계에서는 반도체 위치검출기(PSD: Position Sensitive Detector) 또는 사분할 광검출기(QPD: Quadrant Photo Detector)를 활용한 광기반 PAT 기술이 주로 사용된다. 추가적인 PAT 정밀도 향상을 위한 목적으로 FSO 터미널 내부에 FSM(Fast Steering Mirror)과 별도의 모니터링 시스템을 집적하여 사용하기도 한다. PAT 시스템을 통해 획득한 UAV 위치정보 및 맞은편 FSO 터미널의 상태정보는 FSO 터미널 간 상호 정보전달 과정을 거쳐 Coupled-dynamic PAT 알고리즘에 사용되고, 최종적으로 FSO 터미널 간 LOS 링크 구축과 유지를 위한 제어에 활용된다.

FSO 터미널은 대부분 넓은 각도 동작범위 특성과 유연한 시스템 구성이 가능한 장점을 갖는 김벌 기반 PAT 시스템을 통해 UAV 및 GCS에 탑재된다. 일반적으로 GCS용 PAT 시스템은 탑재중량 및 크기에 제한이 있고 저전력 동작 등을 요구하는 UAV용 PAT 시스템 대비 높은 정밀도와 동작속도 특성을 갖도록 구성된다. 또한 GCS용 PAT 시스템에는 줌(Zoom) 기능을 갖춘 실화상 및 적외선 영상시스템이 추가적으로 탑재되어 초기 PAT 단계의 성능을 높이는 데 활용되기도 한다.

5. UAV Trajectory

UAV의 높은 이동성은 FSO 무선통신 영역을 증가시키고 통신환경 개선을 통한 통신품질 향상에 기여하는 장점이 있으나, UAV의 위치에 따라 인접 FSO 네트워크와 통신영역이 오버랩(Overlap)되어 효율성이 떨어지거나 일시적인 통신영역 공백으로 통신이 두절되는 현상이 발생하기도 한다. 따라서 FSO 무선통신이 적합한 지점으로 UAV를 이동하고 효율적인 네트워크 운영이 가능하도록 UAV 비행 궤적(Flight trajectory) 및 비행 계획(Flight plan)에 대한 최적화 기술이 필요하다. 최근 UAV 기반 모바일 FSO 통신 링크의 형성률을 높이기 위한 목적으로 저장공간이 제한된 UAV를 활용한 중앙식 동적 비행 궤적 제어 알고리즘(Centralized dynamic trajectory control algorithm) 연구가 진행되었다[17]. 관련 연구에서는 지상의 관제시스템을 통해 트래픽 혼잡 상황이 발생한 UAV 부근으로 인접한 UAV의 비행 궤적 중심(Trajectory center)을 이동하고 UAV의 비행반경을 통제함으로써 저장 공간이 부족한 UAV에서 오버플로우(Overflow)가 발생하거나 트래픽 혼잡과 정체 현상으로 UAV에 새로운 통신 링크 형성이 어려운 상황이 발생하는 것을 미연에 방지하기 위한 연구를 수행하였다.

UAV 비행 궤적 최적화는 에너지 효율 최적 관리와 직접적인 연관성이 있으며, 이는 UAV의 비행시간 향상을 통한 네트워크 운영 시간 증가를 위해 반드시 필요하다. 최근에는 UAV의 비행 궤적 최적화 연구와 함께 UAV 에너지 소비모델을 기반으로 UAV 이·착륙 및 비행과정에서 UAV의 속도

(Velocity), 가속도(Acceleration), 고도(Altitude)를 효율적으로 관리함으로써 UAV 기반 무선통신 네트워크의 운용 시간을 향상시키기 위한 연구가 진행되고 있다[18].

6. Network Topology Configuration/ Reconfiguration

UAV 기반 FSO 무선통신 네트워크에서 대기상태 변화 및 UAV 이동에 따라 통신 링크의 신뢰성 변화가 발생한다. 따라서 UAV 기반 모바일 FSO 무선통신 네트워크의 안정적인 운영을 위해 네트워크 토폴로지 구성 및 재구성(Topology configuration and reconfiguration) 기술이 요구된다. 네트워크 토폴로지 재구성 단계는 통신 링크 신뢰성이 문턱값(Threshold) 이하로 떨어지면 시작된다.

최근 UAV 기반 무선통신 네트워크 운영을 위해 UAV 전력소모, 탑재중량 한계, FSO 링크 특성 및 지상의 스몰셀 간 동적 트래픽 수요 등을 종합적으로 고려하여 효율적으로 네트워크 토폴로지를 재구성하기 위한 방법이 연구되었다[9]. 동적 FSO 네트워크 토폴로지 재구성 방법에는 크게 두 가지가 있다.

첫 번째 방법은 선제적 네트워크 재구성(Proactive network reconfiguration) 방법으로 네트워크 통계 자료를 이용하여 특정 시간 및 주기에 대해 주어진 평균 트래픽 수요와 링크 상태를 바탕으로 선제적으로 FSO 기반 프론트홀/백홀 네트워크 토폴로지를 최적화하여 구성하는 방법이다. 본 방법은 FSO 기반 프론트홀/백홀 네트워크의 처리량과 UAV의 전력소모를 동시에 최적화하는 MINLP (Mixed Integer Nonlinear Programming) 문제를 공식화한 것이다.

두 번째 방법은 첫 번째 동적 FSO 네트워크 토폴로지 재구성 방법을 통해 구성된 네트워크 토폴로지를 바탕으로 반응성 네트워크 재구성(Reactive network configuration)을 수행하는 방법으로 트래픽 수요와 링크 상태가 단절되거나 폭발적으로 트래픽 수요가 증가하는 등의 특정 사건 발생 시 능동적이고 적극적으로 네트워크 토폴로지를 조정하여 최적화를 수행하는 방법이다. 반응성 네트워크 재구성 알고리즘으로 링크 방해(Link interrupt)에 의한 링크 단절 상황을 해결하기 위한 RRFLF(Reactive Reconfiguration For Link Failure) 알고리즘과 긴급한 트래픽 수요 상황을 해결하기 위한 RTRTE (Reactive Reconfiguration For Traffic Event) 알고리즘이 제안되었다.

RRFLF 알고리즘은 링크가 단절되는 경우, 최소 용량/비용 비율(Minimum capacity–cost ratio)을 극대화하는 대체 링크를 선택하여 네트워크 토폴로지 특성을 향상시킨다. 그 결과 링크 단절에 의한 네트워크 복구비용은 최소화되고 네트워크 처리량은 최대화되어, 수정된 네트워크 토폴로지는 최적 네트워크 처리량과 네트워크 비용을 갖게 된다. RTRTE 알고리즘은 긴급한 트래픽 수요가 감지된 경우, 네트워크 처리량을 증가시키기 위해 네트워크 토폴로지를 업데이트하는 역할을 하며 최소 용량/비용 비율 분석을 통해 네트워크 처리량을 향상시킬 수 있는 대체 통신 링크를 추가하도록 한다.

7. Security/Privacy/Safety/Regulatory

보안(Security)과 개인정보(Privacy) 보호는 UAV를 이용한 미래 무선통신 네트워크 활용을 위해 기본적으로 요구되는 조건이다. 이와 관련하여 UAV 기반 무선통신 기술에는 다음과 같은 두 가지 주요 이슈가 있다. 첫 번째는 UAV 납치(Hijacked) 또



그림 5 ETRI UAV 기반 모바일 FSO 시제품 및 운용 시스템

는 파괴(Sabotage) 등으로 인한 통신장애 및 단절에 의한 보안 위험이다. 보안 위험과 관련하여 사용자와 무선통신 사업자는 보안에 문제가 발생하지 않도록 별도의 UAV 운용 강화 기술을 개발하고 이를 적용할 필요가 있다. 두 번째는 UAV에 의한 개인정보 및 주요 데이터 노출 위험이다. 이를 사전에 방지하기 위한 방법으로 개인정보 취득이 가능한 불법 임무장비 탑재 금지 및 주요 공공기반시설 상공 UAV 비행금지와 같은 규제조치가 필요하다.

아울러 현재 국가별로 상이한 UAV 안전(Safety), 규제(Regulatory) 및 조종자 자격, 비행승인, 비행안정성 인증 등의 차이와 제한사항들을 고려한 연구개발과 네트워크 운영이 필요하다. 향후에는 관련 기술 발전과 산업 활성화를 위해 통일된 규정을 적용한 국제기준 마련 및 표준화가 필요하다.

V. 향후 발전방향 및 결론

UAV를 활용한 FSO 무선통신 네트워크 기술은 대기에 의한 통신품질 저하가 문제가 없는 성층권 및 위성 간 통신 등에서 한정적으로 연구·개발되어 왔다. 최근에는 UAV 기술의 급속한 발전과 더불어 인터넷 연결이 불가능하거나 열악한 지역, 통신 트래픽이 혼잡한 지역 및 재난·재해 발생으로 긴급통신망 복구가 필요한 상황 등에 신속하고 경제적인 방법으로 무선통신 서비스를 제공하고, 5G+ 네트워크의 프론트홀/백홀 솔루션 제공을 위한 목적으로 UAV를 활용한 모바일 FSO 무선통신 기술이 활발히 연구되고 있다. 앞으로는 모바일 FSO 무선통신 요소기술 발전을 위한 연구와 함께 UAV 최적 운영과 이를 활용한 네트워크 최적화 및 안정성 강화를 위한 다양한 연구가 진행될 것으로 예상된다.

ETRI에서는 모바일 FSO 터미널을 탑재한 드론과 지상의 관제 시스템 간 1Gbps Full-duplex FSO 링크를 지원하는 모바일 FSO 시스템 개발을 수행하고 있다(그림 5 참조). 이를 위해 드론 탑재 및 운용을 위한 FSO 터미널 소형화·경량화 기술, 통신거리 적응형 빔포밍(Adaptive beamforming) 기술, UAV 추적 및 FSO 터미널 간 LOS 구축과 유지를 위한 Coupled-dynamic 정밀 PAT 기술, UAV 비행제어 시스템 연동 김벌 정밀 제어기술, 네트워크 환경 특성을 고려한 FSO 통신기술 등에 대한 연구개발을 진행 중에 있다.

약어 정리

AI	Artificial Intelligence
BBU	Base Band Unit
BER	Bit Error Rate
DGPS	Differential GPS
FC	Flight Control
FSM	Fast Steering Mirror
FSO	Free Space Optical

GCS	Ground Control System
GPS	Global Position System
IMU	Inertial Measurement Unit
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LOS	Line of Sight
LTE	Long Term Evolution
MEMS	MicroElectroMechanical System
MINLP	Mixed Integer Nonlinear Programming
MRR	Modulated Retro Reflector
MRRH	Macro Remote Radio Head
PAT	Pointing, Acquisition and Tracking
PSD	Position Sensitive Detector
PUAV	Primary Unmanned Aerial Vehicle
QPD	Quadrant Photo Diode
RF	Radio Frequency
RRFLF	Reacive Reconfiguration for Link Failure
RTK	Real Time Kinematic
RTRTE	Reactive Reconfiguration for Traffic Event
SRRH	Small Remote Radio Head
SUAV	Secondary Unmanned Aerial Vehicle
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VR	Virtual Reality

참고문헌

[1] H. Kaushal et al., "Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques," *IEEE Commun. Surv. Tut.*, vol. 19, no. 1, 2017, pp. 57-96.

[2] M. Z. Chowdhury et al., "A comparative survey of optical wireless technologies: Architectures and applications" *IEEE Access*, vol. 6, 2018, pp. 9819-9840.

[3] C. Quintana et al., "Design of a holographic tracking module for long-range retroreflector free-space systems," *Appl. Opt.*, vol. 55, no. 25, 2016, pp. 7173-7178.

[4] A. Kaadan et al., "Multielement FSO transceivers alignment for inter-UAV communications," *J. Lightw. Technol.*, vol. 32, no. 24, 2014, pp. 4785-4795.

[5] L. Li et al., "High-capacity free-space optical communications between a ground transmitter and a ground receiver via a UAV using multiplexing of multiple orbital-angular-momentum beams," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 17427, 2017, pp. 1-12.

[6] W. Fawaz et al., "UAV-aided cooperation for FSO communication systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56. No. 1, 2018, pp. 70-75.

[7] M. Alzenad et al., "FSO-based vertical backhaul/fronthaul framework for 5G+ Wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 1, 2018, pp. 218-224.

[8] Y. Dong et al., "An edge computing empowered radio access network with UAV-mounted FSO fronthaul and backhaul: Key challenges and approaches," *IEEE Wireless. Commun.*, vol. 25. No. 3, 2018, pp. 154-160.

[9] Z. Gu et al., "Network topology reconfiguration for FSO-based fronthaul/backhaul in 5G+ wireless networks," *IEEE Access*, vol. 6, 2018, pp. 69426-69437.

[10] H. Kaushal et al., "Free space optical communication," Springer, New Delhi, India, 2017.

[11] Loon [https://www.google.com/intl/es419/loon/]

[12] M. Zuckerberg, "The technology behind Aquila," 2016. [https://www.facebook.com/notes/mark-zuckerberg/the-technology-behind-aquila/10153916136506634]

[13] H. Dahrouj et al., "Cost-effective hybrid RF/FSO backhaul solution for next generation wireless systems," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 22, no. 5, Oct. 2015, pp. 98-104.

[14] B. Moision et al., "Demonstration of free-space optical communication for long-range data links between balloons on Project Loon," in *Proc. SPIE LASE*, San Francisco, CA, USA, 2017, pp. 1-14.

[15] J. Plaza, "Will hydrogen fuel cells help drones stay in the air?," Commercial UAV NEWS, 2017. [https://www.commercialuavnews.com/infrastructure/hydrogen-fuel-cells-drones]

[16] W. S. Rabinovich et al., "Free-space optical communications research and demonstrations at the U.S. Naval Research Laboratory," *Appl. Opt.*, vol. 54, no. 31, Nov. 2015, pp. F189-F200.

[17] Z. M. Fadlullah et al., "A dynamic trajectory control algorithm for improving the communication throughput and delay in UAV-Aided Networks," *IEEE Network*, vol. 30, no. 1, Jan. 2016, pp. 100-105.

[18] Y. Zeng et al., "Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 6, June 2017, pp. 3747-3760.