



총론

글 Morio Toyoshima / (국연) 정보통신연구기구 Wireless Networks 종합연구센터 우주통신연구실 실장
번역 유정훈 / 그린광학 사업개발그룹장

1. 처음

광기술은 넓은 분야로의 응용이 가능하지만, 우주분야로의 적용은 지구관측위성을 위한 광학적 리모트센싱, 우주과학탐사에 대한 레이저분광 카메라와 촬상 스펙트로메터, 우주물리학에 대한 레이저간섭계 우주안테나에 의한 중력파 검출 등 다양한 응용이 기대되고 있다. 그 중에서도 우주통신으로의 광통신 적용은 고속대용량의 데이터 전송이 가능하고, 우주

시스템에 있어 혁신적인 비약을 가져오는 수단이라고 기대되고 있다. 본 특집호에서는 광기술×우주통신을 주제로 일본을 중심으로 발사계획이 구체적으로 진행 중인 광 위성 통신기술의 우주실증 프로젝트에 대해서 최신의 연구개발 상황을 정리해서 소개하는 기획으로 했다.

본 특집호의 각 논문의 투고에서는 우주항공연구개발기구(JAXA)부터 정지궤도(GEO)로 2019년도에 발사를 목표로 현재 개발 중인 광 데이터 중계위성(JDRS)을 중심으로 설명했다. 테마 중계위성은 우주에 대한 광통신 이용으로서 가장 기대되고 있는 용도의 하나이고, 지구관측위성의 데이터 전송능력의 확대를 통해 우주이용의 발전에 기여한다고 기대되고 있는 프로젝트이다.

정보통신연구기구(NICT)에서는 2021년도 발사예정인 기술시험 위성 9호기(ETS-9)에 탑재되는 광 피더 링크(Feeder Link) 시스템의 연구개발상황에 대해서 소개한다. 현재의 위성통신에서 세계최고속도를 실현하는 미션이고, 실현하면 많은 민간위성 오퍼레이터가 참가하고 있는 High throughput 위성(HTS) 업계로 새로운 기술적 혁신을 가져올 기술이다.

저궤도(LEO) 소형위성의 우주실증으로서는 Sony 컴퓨터 사이언스연구소에서 추진되고 있는 광 디스크 기술을 응용한 소형 광통신모듈에 관한 연구개발에 대해서 소개한다. 이것은 국제 우주 정거장에 대한 "KIBO" 선외실험플랫폼(JEM 노출부)을 이용해서 2018년도 후반에 발사가 이미 예정되어 있고, 일본에서 민간베이스에서 최초의 광 위성 통신의 우주실증으로 되므로 주목해야하는 미션이다.

또 집필시점에서 2019년 1월 18일에 우치노우라(宇治の浦) 우주공간관측소에서 발사예정인 광통신기능을 탑재한 50 kg급의 초소형 이학관측위성 RISESAT를 소개한다. 이 위성 버스시스템은 토후쿠대학이 개발하고, 질량 약 700 g의 광통신장치를 NICT가 개발해서 탑재하는 것이고, 50 kg급 소형위성에서 실증되어 있지 않는 body pointing 기술을 광통신에 적용해서 실증실험을 행할 예정이고, 실현하면 이후 초소형 위성 업계에 더욱더 광통신이 활용될 가능성이 있다.

또한 최근 일본에서의 위성양자통신의 우주실증과 중국에서의 위성 양자 키 분배의 우주실증을 시작으로 세계 각국의 위성 양자 암호의 연구개발이 활발히 되고 있다. 우주에 대한 보안 확보의 수단으로서 NICT에서 양자 암호기술의 우주응용에 대한 연구개발상황을 소개한다. 광 공간 통신에 대한 비밀 키 공유의 실증 실험의 결과를 소개하고, 광 공간 통신 테스트베드를 활용한 실제 환경에서의 적용성이 논의되고, 기초기술의 우주실증에서 드디어 실제 환경에서 가동시키는 실용 단계에 들어가고 있어 주목된다.

본고에서는 총론으로서 세계에 대한 광 위성 통신에 관한 최신의 연구 개발 동향에 대해서 개관한다. 게다가 각론의 최첨단의 기사를 읽어 주시고, 본 특별판을 즐겨 주시길 바라는 바이다.

2. 세계의 광 위성 통신의 연구 개발 동향

2.1 광 위성 통신기술의 특징

공간적으로 떨어진 장소로 정보를 전송하기 위해서는 통상, 전파(RF)가 사용되고 있다. 그러나 최근 광섬유 통신을 시작으로 하는 광학기술과 레이저기술의 발달에 동반해 레이저광선을 사용해서 떨어진 우주기간에서 통신을 실현할 수 있는 시대에 돌입했다. 광 위성 통신은 고속·대용량화, 소형·경량화에 적합



한 특징을 가지고, RF에서는 달성할 수 없는 대용량인 통신수단으로서 주목되고 있다²⁾. 최근 위성통신분야에서 혁신적인 변화가 일어나고 있고, 복수의 비 정지인 소형위성에서 글로벌하게 위성통신 서비스를 행하는 위성군(Satellite constellation) 구상이 세계 각국에서 대두하고 있다. 광통신에서는 전파의 법적규제를 받지 않기 때문에 국제 주파수 조정도 필요 없고, 광대역인 주파수자원을 활용할 수 있는 것에서 광통신의 적용이 기대되고 있다. 최근의 2018년 5월에 큐브셋(CubeSat)급의 초소형 위성에서 세계최초로 되는 광통신의 궤도상 실증이 되고³⁾, 이 클래스의 위성에 대해서도 광통신이 실현가능한 것이 나타난 것은 광 위성 통신기술이 보다 사용하기 쉽게 되고, 세계 각국에서 초소형 위성의 연구개발이 활발히 행해지고 있는 것을 생각하면 이후 이용이 확대할 가능성이 있다.

2.2 세계의 우주기관에 의한 연구

미국에 있어서는 미국항공우주국(NASA)이 미래의 통신 구조로서 광과 RF를 모두 혼합하여 사용할 계획이고, 그 중에는 크게 나눠 지구근방용 탑재 광 터미널, 심우주용 탑재 광 터미널, 광 지상국 인프라가 있다. NASA 고다드 우주비행센터(GSFC)에서는 2013년 9월에 달 레이저통신 데몬스트레이션(LLCD)에 의해 달-지구 간에서 622 Mbps의 광통신회선을 성공리에 확립하고, 심우주 탐사기에서의 광통신에 의한 데이터 전송의 실현성을 보여 주었다⁴⁾. 이후의 NASA 계획에서는 LCRD라고 하는 2.88 Gbps의 광 데이터 중계위성시스템을 2019년 6월에 GEO에 발사예정이다⁵⁾. NASA는 장기계획으로서 2024년까지 200 Gbps 이상의 광통신의 전송속도를 목표로 하고 있으며, GEO-GEO 사이에서는 300 Gbps를 목표로 하고 있다.

또 NASA는 2025년에 국제 우주 정거장(SS)으로의 직접적인 예산배분중료를 선언하는 중, 국제협력에 의해 "달 궤도 플랫폼 게이트웨이(LOP-G)"의 구축을 검토하고 있다. 2018년 2월에 미국의 2019년도의 예산이 발표되고, 달로의 유인 우주탐사를 장기 목표로서 100억 달러를 배분하고, 산업계협력 및 국제협력 등에 의해 LOP-G의 구축을 본격화해서 2022년에는 추진계 모듈의 발사를 계획하고 있고, 광통신기술의 이용도 검토되고 있다⁶⁾. 유럽에서는 코페르니쿠스 계획이라고 하는 LEO의 복수 관측

위성을 사용한 지구환경계측을 실시하는 우주정책이 추진되고 있다. 유럽우주기관(ESA)에서는 코페르니쿠스 계획의 관측 위성군에서 정지위성 경유에서 광 데이터 중계를 행하는 유럽데이터 중계시스템(EDRS) 계획을 추진하고 있고, 현재 정지위성 Alphasat와 EDRS-A는 이미 궤도상에 있고, EDRS-C가 2019년에 발사예정이고, LEO의 관측위성군(Sentinel-1A, 1B, 2A, 2B, 3B 등)에서의 관측데이터가 광통신에서 중계되고 있다⁷⁾. ESA에서는 새로운 움직임으로서 위성통신을 위한 혁신적인 광학기술을 개발에서 신 시장 획득까지 지원하는 ScyLight라는 프로그램을 2017년부터 실시하고 있다⁸⁾. 이 프로그램에서는 이하 분야의 광통신기술의 연구개발을 집중해서 추진하고 있다.

- (1) 시스템 레벨에서의 광통신기술
- (2) 광통신 터미널기술
- (3) 위성구체 내 포토닉스/광 페이로드(optical payload)
- (4) 양자 암호기술과 초기서비스의 실증

이 중의 Hydron이라고 하는 프로그램에서는 2021년부터 3기의 호스팅 페이로드 기회를 제공하고, 초대용량인 차세대 High throughput 위성(UHTS)시대의 RF-광 변환과 데이터 다중화·복호화기술, 100 Gbps를 넘는 파장다중(WDM) 등의 광통신기술을 실증하고, 엔드유저와의 일체적인 시스템통합을 실현하기 위한 연구개발이 검토되고 있다.

일본에서는 1994년에 기술시험위성 VI형(ETS-VI)을 사용한 세계최초의 광 위성 통신이 우정성 통신총합연구소(현 NICT)에 의해 실증된 이래⁹⁾, JAXA가 개발한 광 위성 간 통신실험위성(OICETS)에 의해 세계최초의 쌍방향 GEO-LEO 간 레이저 통신실험¹⁰⁾, 세계최초의 LEO-NICT 광 지상국 간의 레이저 통신실험이 성공리에 실시되었다¹¹⁾. 이제부터의 장래계획으로서 JAXA에서는 GEO로 2019년도 발사를 겨냥해서 JDRS가 개발되어 있고, 전송속도 1.8 Gbps의 광통신을 사용해서 관측위성에서의 데이터를 정지위성 경유에서 중계하는 계획이 진행되고 있어¹²⁾ 본 특집호에서 소개한다. 또 정지위성 ETS-9에 탑재예정인 RF의 Ka 대역에서 100 Mbps의 유저링크와, 위성 및 지상 네트워크를 연결하는 피더 링크를 Ka 대역과 광의 하이브리드인 회선에서 행하는 위성통신시스템의 개발이 총무성과 NICT에 의해 추진되고 있다. 재해시에 도움이 선박과 항공기 등의 이동체로의 광대역 환경을 제공하는 새로운 통신위성의 기술실증이 2021년

도 발사를 목표로 계획되어 있다. 이 HICALI라고 하는 광 피더 링크 시스템은 본 특집호에서 소개하고 있고, NICT에 의해 연구 개발이 행해지고 있다¹³⁾.

중국에서는 중국과학원(CAS) 상해광학정밀기계연구소(SIOM)에 의해 LEO-지상 사이에서 5.12 Gbps의 광통신미션이 2016년 8월에 실시되고, 개구 1.2 m 망원경이 설치된 우루무치 Nanshan 광 지상국을 사용해서 상해의 고해상도 화상의 전송실험이 행해졌다¹⁴⁾. 또 중국과학기술대학(USTC)에서는 2016년 6월에 발사에 성공한 위성 “목지(Micius)”를 사용해서 중국과 유럽 사이에서 지구규모의 양자 얽힘을 사용한 양자 키 분배(QKD) 실험을 성공리에 실시하고¹⁵⁾, 또한 양자 텔레포테이션 실험에도 성공했다¹⁶⁾. 우주의 보안 확보의 중요성이 높아지고 있고, 그 중에서 일본의 노력으로서 양자 암호 기술의 우주적응성에 관해서 본 특집호에서 소개한다.

3. 광통신기술을 활용하는 초소형 위성과 위성군의 동향

3.1 초소형 위성의 광통신기술의 실증동향

NICT에서는 초소형 위성으로의 광통신기술의 전개를 겨냥해서 6 kg급의 소형 광 트랜스폰더(SOTA)를 개발하고, 초소형 위성 SOCRATES에 탑재하고, 2015년 6월에 50 kg급 초소형 위성으로는 세계최초로 되는 광통신 실험¹⁷⁾과 2017년 7월에 위성 양자통신의 기초실험¹⁸⁾을 성공리에 실시했다. 더욱이 NICT에서는 본 특집호에서 소개하는 질량 약 700 g의 초소형 광 트랜스폰더(VSOTA)를 개발하고, 광통신 실험을 예정하고 있다. VSOTA는 토후쿠대학과의 협력에 의해 50 kg 클래스의 위성 RISESAT에 탑재되고, 애플론 로켓에 의해 2019년 1월 18일에 발사예정이며, 본고 출판시에는 발사될 것이다. 위성자신의 자세제어에 의해 타깃을 고정도로 추적하는 것을 body pointing이라고 하지만, 50 kg급 소형위성에서 body pointing 기술을 사용해서 광 지상국을 추적하고, 정밀 추적 기능이 없는 초소형의 광통신기기에 광통신을 행하는 것은 아직 실증되어 있지 않고, 실현하면 이후 초소형 위성업계에도 더욱더 광통신이 활용될 가능성이 있다.

독일항공우주센터(DLR) 광통신연구그룹에서는 소형위성탑재용의 광적외 고속통신회선시스템(OSIRIS) 계획에서 궤도상 실증을 추진하고 있다. 이미 발사된 1호기의 OSIRISv1은 Flying Laptop위성에 탑재되어 200 Mbps의 광통신 실험을 행하고 있고, 광 지상국으로의 레이저전송을 성공시키고 있다¹⁹⁾. 2호기의 OSIRISv2로서는 산림화재검출위성(BiROS)이 발사되어 1 Gbps의 광통신 실험을 계획하고 있지만, 현재까지 성공 보고는 되어 있지 않다. 2019년 발사예정인 3호기의 OSIRISv3에서는 10 Gbps의 광통신 실험의 실증을 계획하고 있다. 한편 더욱 소형화를 목표로한 4호기의 OSIRIS4CubeSat에서는 1U의 큐브 셋에서 100 Mbps의 광통신 실험의 실증을 계획하고 있다. 또 위성 오퍼레이터 SES가 DLR을 포함하는 10기관의 컨소시엄을 결인하고 QKD를 사용한 차세대 위성 암호 플랫폼을 개발하는 QUARTZ프로젝터를 2018년 6월에 세웠다.

미국 Aerospace Corporation에서는 2018년 5월에 OCSD라고 하는 1.5U사이즈(1U는 10 cm² 크기)의 큐브 셋(AeroCube-7B)에서는 LEO-지상 사이에서 100 Mbps의 광통신 실험을 성공리에 실시했다²⁰⁾. 이전의 2015년 10월에 발사된 AeroCube-7A에서는 위성의 자세제어에 실패해서 통신에는 이르지 못했지만, AeroCube-7B의 큐브 셋 클래스의 위성에서는 세계최초의 성공으로 되는 우주실증이며, 또한 이후 이용이 확대될 것으로 생각된다.

또 캐논전자의 신규 사업의 창출로서 50 kg급의 초소형 위성을 양산하고, 광 위성 통신에 의한 관측데이터 전송을 행할 계획이 있다. 광통신에서는 다지점의 지상국과 접속해서 송신데이터양 확보와 취득데이터 송신대기시간의 단축을 도모한다. 동사는 “신세대 소형로켓개발기획(주)”을 공동으로 설립하고, SPACE ONE(주)을 2018년 7월 2일에 설립했고²⁰⁾, 발사사업도 포함한 토탈 서비스를 계획하고 있다.

그 외에도 모두 언급할 수는 없지만, 매사추세츠 공과대학에서는 CLICK이라는 큐브 셋의 광통신미션을 계획하고 있고, 그라츠 공과대학에서는 큐브 셋 OPS-SAT의 APD(avalanche photodiode) 어레이에 의한 광 업 링크를 계획하고 있다. 네덜란드의 TNO에서는 1U의 큐브 셋 CubeCAT의 광통신계획, 우크라이나 대학의 3U의 큐브 셋 계획, 비엔나 대학에 의한 1.75U의 큐브 셋의 QKD 미션 등, 많은 초소형 위성의 미션이

표1: 광 위성 통신에 대한 과거의 우주실증과 장래계획

	아시아	미국	유럽
과거의 우주 실증	1994년 ETS-VI/LCE (NICT) GEO-지상 간: 1 Mbps 2006년 OICETS (JAXA/NICT) LEO-GEO: 50 Mbps LEO-지상: 50 Mbps 2011년 HY-2 (중국) LEO-지상 504 Mbps 2015년6월 SOTA (NICT) LEO-지상: 10 Mbps 2016년8월 CAS SIOM (중국) LEO-지상: 5.12Gbps 2017년7월 SOTA (NICT) LEO-지상: 양자 통신 기초실험 2017년7월 목자 (USTC 중국) LEO-지상: 양자 얽힘 QKD -2017년9월: LEO-지상: 양자 텔레포테이션	1995년 GOLD (NASA JPL) GEO-지상: 1 Mbps 2000년 STRV-2 (BMDO실패) LEO-지상: 1.2 Gbps 2001년 GeoLITE (NRO) GEO-지상: 1 Gbps (상징) 2008년 NFIRE (MDA) LEO-LEO: 5.6 Gbps 2013년 LLCDC (NASA GSFC) 달-지상: 622 Mbps 2014년 OPALS (NASA JPL) ISS-지상: 50 Mbps 2015년10월OCSD-AeroCube-7A (Aerospace Corporation 실패) -2018년5월: OCSD- AeroCube-7B 1.5UCubeSat-지상: 50/100 Mbps	2001년 SILEX (ESA) GEO-LEO, GEO-지상, GEO-항공기: 50 Mbps 2008년 TerraSAR-X (DLR) LEO-LEO, LEO-지상: 5.6 Gbps 2011년 BTLS (러시아) ISS-지상: 125 Mbps 2014년 ~: Copernicus (ESA) GEO-LEO: 1.8 Gbps -2014년 4월: Sentinel-1A -2016년 1월: EDRS-A -2016년 4월: Sentinel-1B -2015년 6월: Sentinel-2A -2017년 3월: Sentinel-2B -2019년 4월: Sentinel-3B 2016년 6월: OSIRISv2 (DLR) 2017년 7월: OSIRISv1 (DLR)
장래계획	2019년~: VSOTA (NICT) 2019년~: SOL (SONY) 2019년~: JDRS (JAXA) 2021년~: HICALI (NICT)	2019년~:LCRD (NASA GSFC) 2021년~: DSOC (NASA JPL) 2022년~: LEMNOS (NASA GSFC) 2025년~: LOP-G (NASA)	2019년~: OPS -SAT (TUGraz) 2019년~: OSIRISv3, v4 (DLR) 2019년~: EDRS-C (ESA) 2021년~: ScyLight # 1 (ESA) 2022년~: Moon Village (ESA) 2024년~: DOCS (ESA)

계획되어 제안되어 쏟아져 나오고 있는 상황이다. 표1에 광 위성 통신에 대한 지금까지의 우주실증결과와 이후의 계획에 대해서 정리했기 때문에 참조하기 바란다.

3.2 위성군 동향

최근, 복수의 비 정지 소형위성에서 글로벌로 통신서비스를 행

하는 위성군의 구상이 세계 각국에서 대두하고 있다. 지금까지의 정지위성의 통신위성에서 저궤도·중궤도의 위성군을 사용하는 것에 의해 전송거리가 짧게 되어 낮은 지연에서 송신전력도 낮게 억제되는 것 등에서 탑재기기의 소형화에 적합한 특징을 가지고 있다. 또 RF 위성통신시스템에서는 무선국 면허로 주파수를 확보할 필요가 있고, 위성 수도 많고 적용 영역도 세계 각국과의 국제조정이 필요해서 막대한 시간과 노력을 요하지만,

광통신에서는 필요 없고, 이와 같은 위성군 구상으로 광통신을 적용하는 움직임이 활발해지고 있다.

미국 Laser Light Communications에서는 HALO궤도라고 하는 12기의 MEO위성을 사용해서 통신용량 7.2 Tbps급의 광통신서비스를 생각하고, 전송속도는 100 Gbps급으로 있다. 호주의 Optus사와 협력하여 위성과 지상시스템을 준비하고 있으며, 지상 광섬유 케이블 시스템과 글로벌 네트워크를 구축한다는 구상이다²¹⁾.

미국 Bridgesat는 초소형위성의 LEO군에 의해 전송속도 10 Gbps를 겨냥한 광통신서비스를 생각하고 있다. 전술한 Aero-space Corporation의 OCSD를 베이스로 탑재 광통신기기를 개발하고, 소프트웨어 모뎀을 가지는 광 지상국을 개발하고, 세계 중에 50중계 노드의 광 지상국 네트워크를 구축할 계획이고, 소형위성과 무인항공기(UAV)에 광통신서비스를 제공할 계획이다²²⁾.

미국 LeoSat에서는 108기의 LEO군에 의한 RF 통신서비스를 제공하고, 2019년말~2020년 초두에 걸쳐 78기에서 풀 오퍼레이션을 예정하고 있다. 지상 섬유 망에서 낮은 지연을 실현(50~60 ms이하)할 수 있어 B to B의 기업 간 거래서비스가 메인이고, 1유저에 대해서 50 M ~ 7.2 Gbps의 통신을 제공할 예정이다²³⁾. SKY Perfect JSAT도 2017년 5월 11일에 LeoSat계획에 투자하고 있다²⁴⁾.

독일의 eightyLEO는 288기의 위성군에 의해 독일정부의 인더스트리4.0의 지침하에 IoT의 활용을 중심으로 둔 통신, 특히 커넥티드 car로의 통신서비스를 겨냥하고 있다. 이 위성군 중에서 위성 간 통신에 광통신을 사용하는 것을 생각하고 있다²⁵⁾. 이후 이들 IoT시장에 우주통신 인프라가 어떻게 연계하여 기여할 수 있을지가 주목된다.

또 보안의 관점에서는 SpaceBelt에 의한 위성 12기의 군에 의한 엔드 to 엔드의 암호화된 시큐리티 클라우드의 구축 등이 제안되고 있다²⁶⁾. 2025년까지 엑사 바이트의 스토리지를 가지는 클라우드를 구축할 계획이고, 2019년에 1기를 발사하고, 2025년까지 군을 완성예정이다.

일본에서는 Sony 컴퓨터 사이언스연구소에 의해 LEO 위성 9기에 의한 군에서 100 Mbps급의 전송속도를 실현하는 광 위성 통신서비스가 검토되고 있다²⁷⁾. 그 실증실험으로서 2019년 초두

에 ISS로 광통신기기를 발사해서 광통신의 실증실험이 계획되고 있다. 본 특집에서는 그 실증실험의 연구 개발 동향을 소개하고 있기 때문에 상세는 그쪽을 참조하기 바란다.

이상과 같이 민간 주도로 다양한 시스템구상이 나오고 있는데 사실상의 표준이라는 선택 사항도 있지만, 당연히 표준화가 중요한 요소가 되어 가고 있다. 우주기관 간의 표준화의 장소인 우주데이터시스템 자문위원회(CCSDS)에서는 NASA가 의장을 맡아 표준화를 추진하고 있다. 향후의 발전을 위해 광 위성 통신기술이 여러 가지 초소형 위성군 등에 원활하게 전개되도록 표준화를 가속해 갈 필요가 있다.

4. 정리

본고에서는 일본과 세계에 대한 광 위성 통신에 관한 최신의 연구 개발 동향에 대해서 소개했다. 세계 각국에서 광 위성 통신기술의 궤도상 실증이 쌓이고 있고, 큐브 셋 클래스에서도 세계최초의 우주실증도 된 것에서 여러 가지 이용유저에 의해 이후 이용이 확대한다고 생각된다. 일본에서는 국가의 연구개발기관에 의한 광 위성 통신기술의 연구개발뿐만 아니라 민간에서의 개발도 활발해지고 있어 향후 본 특집호에서 취급한 광기술×우주통신에 관한 우주 미션이 실증되고, 더욱이 실용화가 가속해간다고 생각된다. 일본에 대한 구체적인 발사계획을 가지는 최첨단의 광 위성 통신과 양자 암호기술에 대해서 본 특집호에 의해 독자의 이해가 깊어지길 바란다.

참고문헌

- 1) V. W. S. Chan, "Optical satellite networks," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, pp. 2811-2827 (2003).
- 2) M. Toyoshima, "Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications [Invited]," *Journal of Optical Networking*, Vol. 4, pp. 300-311 (2005).
- 3) T. Rose, "Optical Communications Downlink from a 1.5U Cubesat: NASA OCSD Program," *Proc. of ICOS, Chania, October 9-12 (2018)*.
- 4) D. M. Boroson, "Overview of the Lunar Laser Communication Demonstration," *Proc. ICSOS 2014, S1-2, Kobe, Japan, May 7-9 (2014)*.
- 5) B. L. Edwards, et. al., "An Overview of NASA 's Latest Efforts in Op-



- tical Communications,"Proc. IEEE ICSOS 2015, New Orleans, U.S.A, October 27-28 (2015).
- 6) W. H. Gerstenmaier, "Moving human presence into the solar system: from ISS to the moon and onto Mars,"IAC, B3.1.4, Bremen, October 1-5 (2018).
 - 7) H. Hauschildt, "Global Quasi-Real-Time-Services back to Europe: EDRS Global,"Proc. ICSO, Chania, October 9-12, (2018).
 - 8) H. Hauschildt, "ESAs ScyLight Programme, Activities and status of the High throughput Optical Network "HydRON","Proc. ICSO, Chania, October 9-12, (2018).
 - 9) Y. Arimoto, et. al., "Laser communication experiment using ETS-VI satellite,"CRL Journal, Vol. 42, No. 3, pp. 285-292 (1995).
 - 10) T. Jono, et. al., "OICETS on-orbit laser communication experiments (Invited Paper),"Proc. SPIE, Vol. 6105, pp. 13-23 (2006).
 - 11) M. Toyoshima, et. al., "Results from phase-4 Kirari optical communication demonstration experiments with the NICT optical ground station (KODEN),"27th AIAA ICSSC, AIAA-2009-3.4.2, Edinburg, June 1-4 (2009).
 - 12) S. Yamakawa, et. al., "JAXA 's Optical Data Relay Satellite Programme,"Proc. IEEE ICSOS 2015 (2015).
 - 13) Y. Munemasa, et. al., "Design status of the development for a GEOto-ground optical feeder link,"SPIE Proc., Vol. 10524, 105240F (2018).
 - 14) W. Chen, et. al., "12 Gbps Optical Communication Link Between LEO Satellite and Ground Station,"IEEE ICSOS 2017, S9.1, Naha, Nov. 14-16 (2017).
 - 15) S.-K. Liao, et. al., "Satellite-to-ground quantum key distribution,"Nature, Vol. 549, pp. 43-47 (2017).
 - 16) J.-G. Ren, et. al., "Ground-to-satellite quantum teleportation,"Nature, Vol. 549, pp. 70-73 (2017).
 - 17) <http://www.nict.go.jp/press/2015/06/03-2.html>
 - 18) H. Takenaka, et. al., "Satellite-to-ground quantum-limited communication using a 50-kg-class microsatellite,"Nature Photonics, Vol. 11, pp. 502-508 (2017).
 - 19) C. Fuchs, "Update on DLR 's OSIRIS program,"Proc. ICSO, Chania, October 9-12, (2018).
 - 20) <https://www.space-one.co.jp/doc/pressrelease.pdf>
 - 21) <http://www.laserlightcomms.com/>
 - 22) <http://www.bridgesatinc.com/>
 - 23) <http://www.leosat.com/>
 - 24) <http://www.eightyleo.com/>
 - 25) https://www.jsat.net/common/pdf/news/news_2017_0511_jp.pdf
 - 26) <http://spacebelt.com/>
 - 27) K. Iwamoto, et. al., "Small optical inter-satellite communication system for small and micro satellites,"SPIE Proc., Vol. 10096, 100960T (2017).