

광 데이터 중계위성 우주이용 확대를 위한 통신 인프라

글 Shiro Yamakawa / (국연) 우주항공연구개발기구 제우주기술부문 JDRS 프로젝트팀 미션 매니저
번역 유정훈/ 그린광학 사업개발그룹장

1. 처음

위성을 이용한 지구관측(원격 탐사)은 종래부터 행해져 온 과학이용에 더해, 환경관측·감시, 지도작성, 지구과학, 재해관측과 예방을 위한 제반 활동(재해관리), 농림수산업 등으로 확대해서 이용되기 시작하고 있다. 이들 니즈는 지구관측위서의 관측공간분해능, 동시관측영역, 운용위성기수의 향상에 의한 관측 데이터의 증가에 의해 지탱되는 것이다. 결과로서 관측데이터를 대량인 한편 우수한 즉시성에서 지상에 전송하는 기술이 불가결로 된다. 그 해결수단으로서 궤도상에 통신중계점으로 되는 위성을 배치하는 “데이터 중계 위성시스템”이 있다.

종래, 위성과 지상 및 위성 사이를 연결하는 통신은 지상의 무선통신과 같이, 전파가 사용되어 왔지만, 이후의 우주이용·활동의 확대를 향해 주파수대역의 팽박이 과제로 되어 있다. 따라서 전파를 광으로 바꾼 광 우주통신이 그 확대역성, 높은 간섭·방해·도청 방지 등의 관점에서 기대되고 있다. 또한 광 우주통신은 레이저가 가지는 예리한 지향성에 의해 광 안테나 등의 기기의 소형·경량화와 그에 따른 위성 탑재성의 향상을 기대할 수 있다.

본고에서는 우주항공연구개발기구(JAXA)가 2019년도 발사예정으로 개발을 실시하고 있는 광 우주통신을 사용한 데이터 중계위성(JDRS계획)에 대해서 그 목적, 개요, 진행상황에 대해서 보고한다.

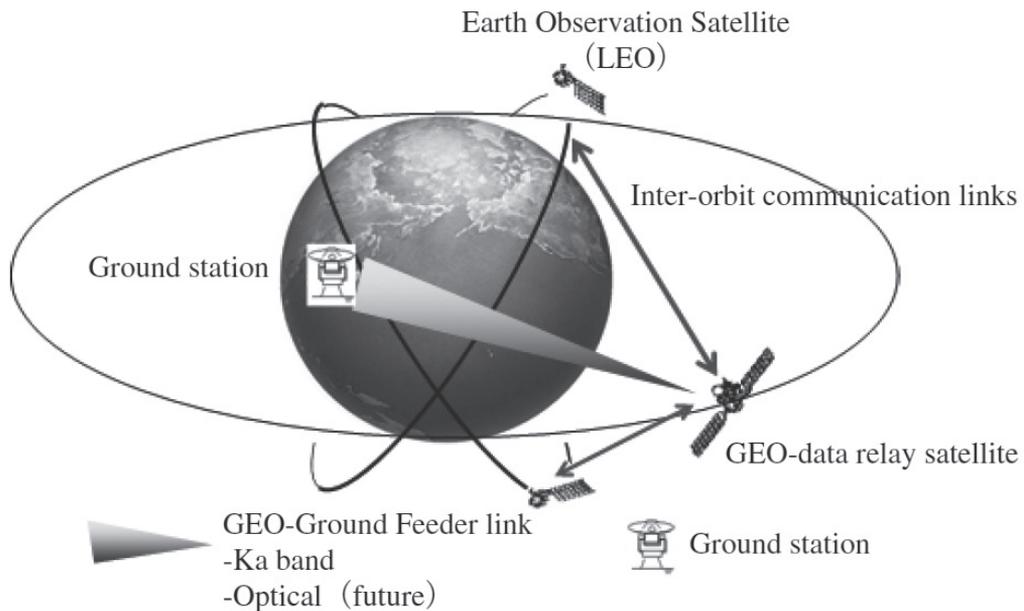


그림1: 데이터 중계위성 개념도

2. 데이터 중계위성

지구관측위성은 관측해상도의 향상을 위해 지구 저궤도(Low Earth Orbit, LEO)에서 운용되는 것이 많다. 동 궤도의 위성은 지구를 90분 정도에서 주회하기 때문에 지상의 한 수신국에서 위성이 “보이는”시간(가시시간)은 10분 정도로 된다.

최근, 관측데이터가 대폭으로 증가하고 있는 것을 생각하면, 이 시간제약은 지구관측위성의 능력을 충분히 끌어내어 활용하는 상에서 병목 현상으로 될 가능성이 나왔다.

이 가시시간을 대폭적으로 확대하는 방법으로서 정지위성을 중계노드로 하는 데이터 중계위성기술이 있다. 적도상공 약 36,000 km에 있는 정지궤도(Geostationary Orbit, GEO)에 배치된 정지위성은 지구의 자전주기와 같은 궤도주기를 가지기 때문에 지상수신국에서는 같은 위치에 정지해있는 듯이 보인다. 데이터 중계위성에서는 데이터 중계기능을 가지는 위성을 GEO 상에 배치한다. LEO의 지구관측위성은 관측데이터를 데이터 중계위성으로 전송한다(그림1). LEO 위성의 90분정도의 주회시간

중 절반이상은 데이터 중계위성과 통신이 가능으로 된다.

데이터 중계위성은 LEO 위성에서 받은 데이터를 지상의 피더 링크국에 중계한다. 피더 링크국은 정지위성인 데이터 중계위성과 24시간 통신가능하다. 따라서 데이터 중계위성을 사용하는 것에서 가시시간 즉 관측데이터의 전송시간을 대폭적으로 확대할 수 있다(그림2). 또 가시시간이 긴 것에서 재해관측 등의 긴급 관측으로도 대응이 가능으로 된다.

JAXA는 데이터 중계위성 “코다마”(DRTS)를 개발하고, 2002년에 발사했다. “코다마”는 Ka 대역의 마이크로파에 의한 최대 약 240 Mbps의 데이터 중계기능을 가진다. 2017년 8월의 운용종료까지 “코다마”는 육역관측기술위성 “다이치”(ALOS) 및 “다이치2”(ALOS-2)를 중심으로 막대한 지구관측데이터의 전송에 기여해왔다. 이것에 의해 데이터 중계위성의 유효성이 나타나는 것과 함께 중계회선의 대용량화 및 위성 간 통신기기의 소형·경량화를 실현할 수 있는 데이터 중계회선의 광화(光化)에 기대가 높아졌다.

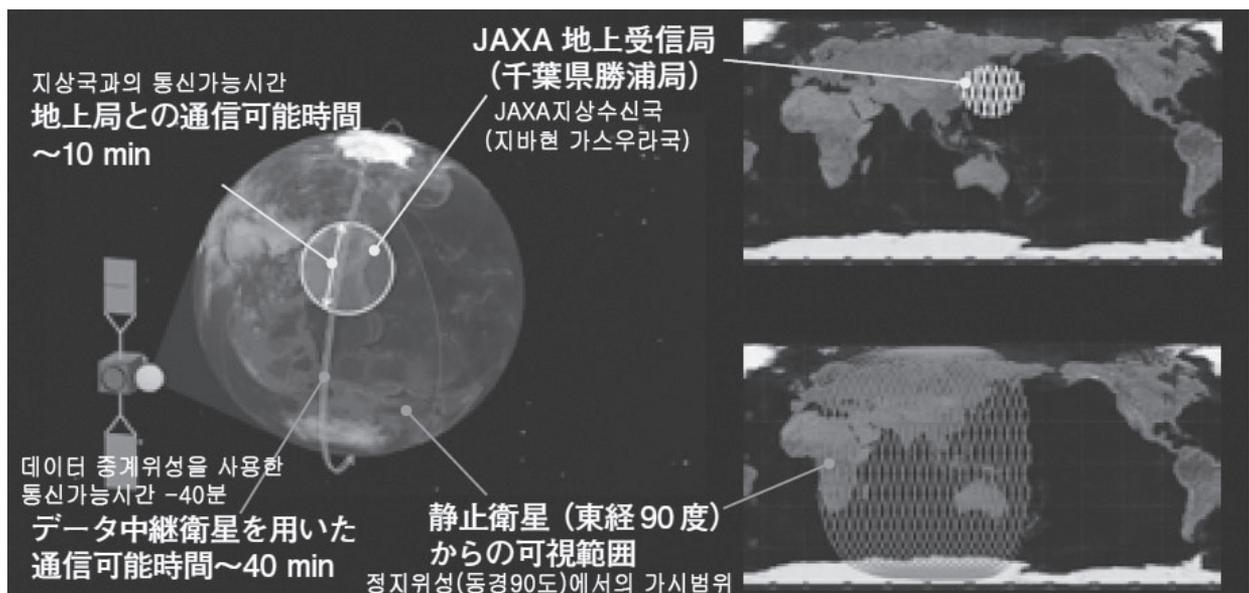


그림2: 데이터 중계위성에 의한 가시범위의 확대

3. 광 위성 간 통신실험위성(OICETS): 광 데이터 중계위성을 향한 첫 스텝

데이터 중계위성으로의 광 우주통신의 이용을 향한 기술 확립을 목표로해서 우주개발사업단(NASDA: 현 JAXA)은 광통신 터미널을 탑재한 LEO 위성 “키라리”(OICETS)를 개발하고, 유럽우주기관(ESA)과 협력해서 ESA의 정지위성 ARTEMIS와의 사이에서 광 위성 간 통신의 궤도상 실험을 행했다. “키라리”는 2005년 8월에 발사되고, 동년 12월부터 ARTEMIS 위성과 광통신 실험을 실시했다. “키라리”는 발사 후 운용종료까지 ARTEMIS 사이에서

광통신 실험을 행해 100회의 광 회선 확립에 성공했다. 광 위성 간 통신의 실용화를 향한 안정한 기능·성능을 확인할 수 있었다.

“키라리”의 성공은 이에 앞서 ESA에 따르면 ARTEMIS와 SPOT-4 사이의 위성 간 통신실험과 함께 광 위성 간 통신이 실현가능한 기술인 것을 인상 지웠다. 따라서 일본으로서 기술적 난이도가 높은 핵심 요소기술인 포착 추적기술을 획득할 수 있었던 것이 의의 깊다고 생각한다.

4. 광 데이터 중계위성

JAXA는 차세대 데이터 중계위성시스템으로서 광 데이터 중계위성(JDRS)의 개발에 착수하고 있다(그림3).



그림3: 광 데이터 중계위성(JDRS)

표1: 주요제원

유저 데이터 속도	리턴회선: 1.8 Gbps 포워드회선: 50 Mbps
비트 에러율	리턴회선: $1e-5$ 포워드회선: $13-6$
통신파장	리턴회선: 1560 nm 대역 포워드회선: 1540 nm 대역
변복조방식	리턴회선: RZ-에나-DD 포워드회선: IM-DD
통신 가능한 유저위성	동시 1기 궤도고도: 200-1000 km(지구주회궤도)
설계수명	GEO 탑재 광위성 간 통신기: 10년 GEO 탑재 광위성 간 통신기: 7년
정지궤도위치(조정중)	동경 90.75도
발사 로켓	H-IIA
발산 연도	2019년도

(*) 유저위성에서 광 데이터 중계위성으로의 회선: 리턴
광 데이터 중계위성에서 유저위성으로의 회선: 포워드

이 시스템은 지구관측위성 등의 시스템 이용유저로 되는 LEO 위성에서 정지데이터 중계위성을 거쳐 지상으로의 통신회선(리턴회선)에 있어 전송속도 1.8 Gbps를 실현한다. 또 지상국과 JDRS를 연결하는 통신회선(피더 링크 회선)에는 운천등을 고려해서 종래대로의 전파(Ka 밴드)를 사용한다. JDRS의 주요제원을 표1에 나타냈다. 본 계획에서는 LEO 위성에 탑재하는 광 위성 간 통신기기도 더불어 개발하고, 거의 동시기에 발사를 계획하고 있는 JAXA의 광학지구관측위성인 선진광학위성(ALOS-3)에 탑재한다. 이것에 의해 광 데이터 중계위성시스템의 궤도상 실증을 행함과 동시에 ALOS-3에서의 관측데이터의 전송에 이용할 예정이다.

5. 주요기술

“키라리”에서 실현성이 나타났다고 할 수 있고, 보다 실용시스템에 가까운 광 데이터 중계위성 시스템에서는 통신 속도의 대폭향상과 탑재 광통신기기의 소형화·고신뢰성화에 있어 큰 기술적 비약이 있다.

5.1 포착 추적 기술

레이저 지향성의 높음에 의해 GEO-LEO 간의 약 42,000 km의 전파 후에도 레이저 빔의 확대는 직경 500 m 정도이다. 따라서 통신 상대의 위성을 확실히 포착하고, 상호 안정해서 빔을 계속 조사하는 “포착 추적 기술”의 실현이 매우 중요하다. 포착초기의 단계에서 빔을 스캔하거나 혹은 포착초기의 단계만 넓게 퍼지는 비콘 빔(beacon beam)을 사용하는 등의 연구가 불가결하다.

“키라리”의 경우, 포착 추적방식은 ESA가 ARTEMIS 위성에서 개발한 SILEX방식을 이용했다. 이것은 GEO 위성(ARTEMIS위성)측이 통신광과는 별도로 비교적 강도가 높고, 넓은 빔 확산을 가지는 비콘 광을 사용하는 방법이고, 포착에 필요한 시간이 짧은 한편 심플한 포착 추적을 실현할 수 있다. 한편 통신용과는 별도의 광원과 그것을 위한 추가의 광학계가 필요로 된다는 큰 단점이 있다.

그 때문에 JDRS의 광 데이터 중계위성시스템에서는 통신광 만에서 포착 추적을 확립하는 비콘레스(beaconless) 방식을 채용하는 것으로 했다. 비콘레스 방식에서는 포착 추적전용의 비콘을 사용하지 않고, 통신 빔 만에서 포착 추적을 실현한다. “통신상대위성이 존재 한다”는 추정영역을 확산이 좁은 통신 빔에서 스캔하기 위해 전용의 비콘을 사용하는 방식과 비교해서 포착시간이 길게 된다.

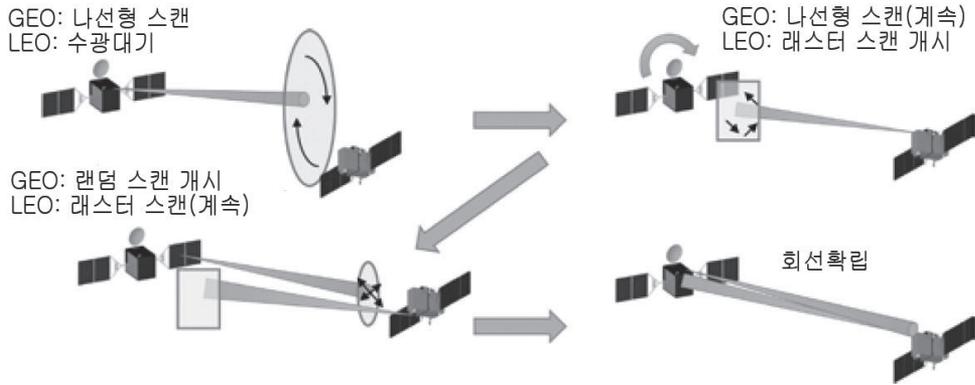


그림4: 포착·추적확립 시퀀스

JDRS의 포착 추적방식은 이하와 같다. 포착 추적의 시퀀스를 그림4에 나타냈다. 상호의 광통신 터미널이 주어진 자(自)위성의 궤도위치와 위성자세 및 상대위성의 궤도예측위치를 기초로 거친 포착 추적기구(CPM)라고 하는 집벌을 상대위성에 지향하고, 상대위성에서의 수광을 가지는 것에서 포착 추적 시퀀스를 시작한다.

첫 번째 작업은 GEO 측의 광통신 터미널이 상대위성을 향해 나선형으로 빔을 스캔하는 것부터 시작한다. 이 스캔은 광통신 터미널 내부에 탑재하고 있는 FPM(후술)이라고 하는 소형거울을 구동시키는 것에 의해 행한다. 스캔범위는 상대위성의 경우에는 약 50 km정도의 범위이다. 이 50 km 범위를 500 m 정도의 확산을 가지는 빔을 나선형 주사하는 것에서 “빈틈없이 칠해”가는 이미지로 된다. 나선은 반복해서 실시한다.

LEO 측의 광통신 터미널은 이 GEO 측에서의 나선형 주사광을 간헐적으로 수신한다. 3회 이상 수신한 단계에서 GEO 위성의 위치를 비교적 고정도로 추정하고, LEO 측 광통신 터미널은 보다 좁은 범위(10 km²정도)를 통신 빔에서 래스터 스캔한다.

이때, 인공위성은 7.9 km/s정도로 고속으로 이동하고 있는 것. 상호 42,000 km 떨어져있기 때문에 광의 전파에 왕복 약 0.3 초 걸리는 것에서 광을 “들러보내는”경우, 광이 도래한 방향에서 상대위성의 진행방향으로 비켜서 송신할 필요가 있다. 이것

을 광행차보정(point ahead)이라고 한다.

GEO 측은 LEO 측의 래스터 스캔 광을 5회 이상 수신하고, LEO 위성의 위치 추정범위를 좁혀감과 함께 나선형 스캔을 중지하고, 반경 6 km정도의 범위를 랜덤 스캔한다. 좁힌 범위를 주사하기 위해 LEO 측에 있어서는 수광하는 빈도가 대폭적으로 올라간다.

이것에 의해 LEO 측은 GEO 측 위치불확정성을 좁혀갈 수 있고, 이 시점에서 래스터 스캔을 종료해도 GEO 측은 LEO 측에서의 광을 거의 연속적으로 수광할 수 있는 상태로 된다. 이것에 의해 GEO는 랜덤스캔을 종료하고, 내부 거울을 구동시켜 수신광 광도가 최대로 되도록 제어한다. 이것에 의해 GEO 측에서 LEO 측을 향하는 광의 지향도 안정하기 때문에 LEO 측도 연속적인 수신이 가능으로 되고, 포착 추적의 시퀀스는 완료한다.

5.2 통신기술

통신회선은 사용자 데이터 속도로서 포워드 회선(지상→GEO→LEO) 50 Mbps, 리턴회선(LEO→GEO→지상) 1.8 Gbps 이다.

“키라리”에서는 광통신의 데이터 속도는 최대에서 50 Mbps였기 때문에 800 nm대역의 반도체레이저를 직접 구동해서 변조

하고, 수신광도 직접 avalanche 포토다이오드로 검파·복조하는 IM-DD방식을 채용하고 있었다.

한편 광 데이터 중계위성시스템에서는 데이터 속도가 리턴회선에서는 1.8 Gbps로 되기 때문에 구성도 변복조방식도 지상의 광섬유 통신기술을 최대한 활용해서 고성능화를 도모했다. 통신 파장은 광섬유 통신에서 사용되는 1.5 μm 대역을 사용하고 있다. 1.8 Gbps의 리턴 링크는 변조방식으로서 지상에서 기술이 확립하고 있는 RZ-DPSK방식을 사용하는 것으로 했다. 또 수신측에서는 에르븀 첨가 광섬유 증폭기(EDFA)를 사용한 광 저잡음증폭기(LNA)에 의해 프리 앰프하고, 지연간섭계 및 밸런스 수신기에 의해 검파를 행한다.

광 위성 간 통신에서는 광섬유 통신과 달리 중계증폭이 불가능하기 때문에 송신측에서는 2~3 W정도까지 광 증폭할 필요가 있다. 또 광통신기내에서 송신광과 수신광을 분리하기 위해 편파특성이 중요하기 때문에 와트급의 편파 유지형 1.5 μm 대역 에르븀·이테르븀 첨가광섬유 증폭기(EYDFA)를 광 고출력 증폭기(HPA)로서 사용했다.

포워드 회선에 대해서는 50 Mbps에서 충분하기 때문에 IM-DD 방식을 사용하고 있다.

리턴/포워드 회선 모두 리드솔로몬(RS) 에러 정정 부호를 채용하고 있다.

피더 링크에 사용하는 Ka 대역의 전파의 통신기술에 대해서도 리턴 링크에 대해서 1.8 Gbps(에러 정정 부호를 포함해서 2.0 Gbps)의 통신회선을 정지궤도에 배치되는 JDRS에 할당된 주파수 대역에 맞게 1 Gbps의 QPSK 변조파인 한편 편파다중방식을 사용하고 있다. 또 Ka 대역이므로 호우시 전파의 강우 감쇠가 큰 영향을 미친다. 대책으로서 지상의 송수신안테나를 이바라키현 츠쿠바시의 JAXA 츠쿠바 우주센터 및 사이타마현 히키군 하토야마마치의 JAXA 지구관측센터의 2개소에 설치하여, 강우상황에 따라 송수신국을 전환하는 사이트 다이버시티(site diversity) 방식을 채용했다.

5.3 광 위성 간 통신기기

GEO용 광 위성 간 통신기기는 광학부(OPT), 광 트랜스폰더부, 피더 링크부 및 전체를 제어하는 제어회로부로 구성된다.

LEO용 기기의 구성도 피더 링크부가 없는 이와는 GEO용 기기와 동일하다. 단기간에서 확실히 개발을 행하기 때문에 LEO용 광 위성 간 통신기기는 GEO용 기기와 공용설계를 진행하고 있다. 여기에서는 제어회로부 이외의 기기에 대해서 설명하겠다.

(1) 광학부(OPT)

광학부는 통신상대위성을 지향하기 위한 2축 짐벌로 이루어진 거친 포착 추적기구(CPM), 광 안테나, 짐벌로 얻어지는 보다 높은 정도에서 송수광의 광축을 조정하는 정 포착 추적기구(FPM), 광행차보정을 행하기 위해 송신광에 대해 오프셋 각을 주는 광행차보정기구(PAM) 및 내부광학부(IOU)로 구성된다.

CPM은 GEO용 기기에 대해서는 1매의 거울을 Az/El 양축에서 $\pm 12 \text{ deg}$ 구동시키는 방식이다. 이것에 의해 지구주위를 행하는 LEO 위성과, LEO 위성이 JDRS에서 보아 지구의 그림자에 들어가 있는 경우를 제외하고 통신시야에 넣는 것이 가능하다. LEO용 기기의 CPM은 넓은 구동범위를 필요로 한다. 그 때문에 GEO용 기기의 CPM과는 달리 2매의 거울을 짐벌로 구동하는 방식에 의해 넓은 지향범위를 실현하고 있다.

광 안테나는 3매 구성의 비축거울 구성으로 하고 있고, 송신광이 수신광과 간섭을 행하는 백 반사를 최소화되는 동시에 카세그레인 거울에 보이는 부경에 의한 송신광의 차폐도 발생하지 않는다. 광 안테나의 유효구경은 GEO용 기기 14 cm에 비해서, LEO용은 소형·경량화를 목표로 9 cm로 하고 있다.

IOU는 내부를 송수신광이 자유공간 전파한다. 수신광에 대해서 그 광축 각도를 검출하는 수광센서, 자유공간 광을 광섬유에 결합하는 섬유 콜리메이터, 광학필터와 빔 스플리터 등의 광학소자로 구성된다.

포착 추적은 IOU 내의 수광센서에 의해 CPM과 FPM 및 PAM을 적절히 제어하는 것에 의해 실현한다. 5.1항에서 말한 각종 스캔은 FPM 및 PAM을 구동시키는 것에서 실현한다. 외관도를 그림5에 나타냈다.

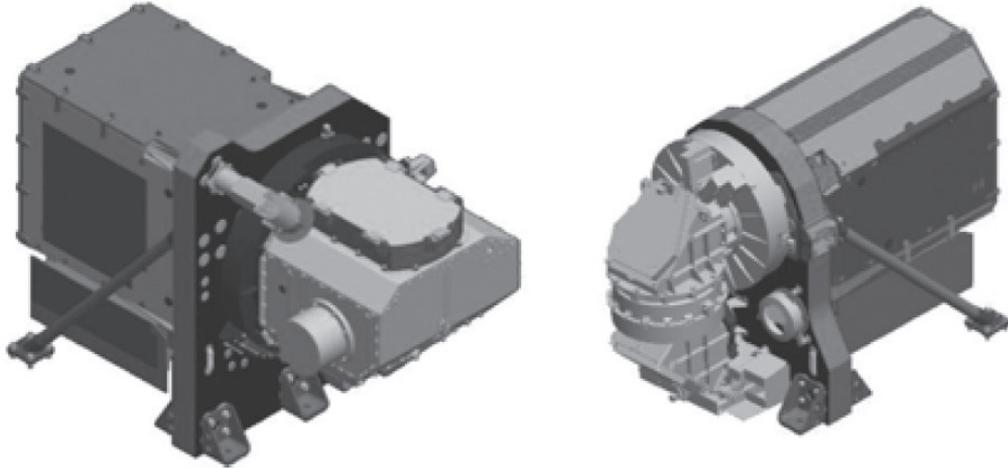


그림5: 광 위성 간 통신기기 광학부(OPT) 좌 GEO용 / 우 LEO용
각각 하측이 위성구체로의 설치면으로 된다.

(2) 광 트랜스폰더

광 트랜스폰더는 위성탑재기기로서는 광송수신부(OTRX), 광증폭기(OAMP)로 구성되어 있다.

OTRX의 송신부는 GEO용 기기에 대해서는 피더 링크부에서 받은 포워드회선 신호를 RZ-IM방식에서, LEO용 기기에 대해서는 탑재위성에서 받은 관측데이터를 포함하는 1.8 Gbps의 리턴회선용 신호에 RS 에러 정정 부호와 제어신호를 부여해서 2.5 Gbps의 RZ-DPSK방식에서 광변조 한다. 어느 것도 OAMP의 HPA에서 증폭하고, OPT에 광섬유를 거쳐 전달한다.

상대위성에서의 수신광은 OPT에서 OAMP의 LNA에 광섬유에서 전송되고, GEO용 기기의 경우는 지연간섭계 및 밸런스 리시버에서 수광·피검하는 것에서 베이스밴드신호로 변환된다. 얻어진 베이스밴드신호를 derandomization, 병렬화 등의 처리를 행하고, 피더 링크기기를 구성하는 2대의 변조기(MOD)에 입력된다.

LEO용 기기의 경우는 포토다이오드에서 전기신호로 변환하고, RS복호기, 탑재위성으로 이끌어진다.

(3) 피더 링크부

GEO용 기기에는 포워드회선, 리턴회선 각각에 대해서 지상의 통신국과 통신하기 위한 RF기기가 탑재되어 있다.

리턴계에 대해서는 OTRX에서 1 Gbps×2계통의 신호로서 출력된 신호는 각각 2대의 MOD에서 16 QAM 변조된다. 변조된 신호는 최종적으로 편파 다중된 2파의 Ka대역 파에서 다운 링크된다.

5.4 지상시스템

JDRS에서 정비하는 지상시스템은 전술한 대로 피더 링크국을 츠쿠바와 하토야마에 정비한다. 리드슬로몬의 부호화 및 복호화, 수신데이터의 일시보존과 사용자와의 데이터의 송수신, 포워드 회선에서 유저로 되는 LEO 위성의 제어명령을 송신하기 위한 명령송신제어기능 등을 가진다. 광 위성 간 통신시스템의

6. 결론

JAXA에 대한 광 우주통신의 연구의 일례로서 데이터 중계위성으로의 이용을 목표로 한 활동을 현재 개발 중의 광 데이터 중계위성(JDRS)을 중심으로 설명했다. 데이터 중계위성은 우주에 대한 광통신이용으로서 가장 기대되고 있는 용도의 하나이고, 지구관측위성의 데이터 전송능력의 확대를 통해 우주이용의 발전에 기여한다고 생각한다.

또 JDRS의 개발을 통해 획득하는 광 우주통신기술을 다른 우주통신기술 분야에 적용해 가는 것에서 우주의 통신 인프라의 대폭적인 능력향상이 가능으로 된다. 일본 및 인류에 있어서 보다 우주이용의 확대에 연결하는 것을 기대한다.

감사

“키라리” 및 이번의 광 데이터 중계위성에 탑재하는 광통신기기 및 운용에 필요한 관련지상설비는 일본전기(주) 및 NEC스페이스(주)에 의해 설계 제조되고 있다. 또 JDRS 프로젝트의 실시에는 미츠비전기(주), 스카파 JSAT(주) 외 많은 조직·기업의 참가·협력을 얻고 있다. 또 정보통신연구기구의 협력에 의해 JDRS 탑재 광 통신기기의 교정과 미래를 위한 실험의 계획과 실시를 행한다. 여기에서 감사를 표하고 싶다.