

## 지상국 추적 데이터를 이용한 저궤도 위성의 궤도결정 특성 분석

정옥철\*, 최수진\*\*, 정대원\*\*\*, 김은규\*\*\*\*, 김학정\*\*\*\*\*

### Orbit Determination of LEO Satellite using Ground Tracking Data

Ok-Chul Jung\*, Su-Jin Choi\*\*, Dae-Won Chung\*\*\*, Eun-Kyou Kim\*\*\*\*, Hak-Jung Kim\*\*\*\*\*

#### Abstract

This paper analyzes the orbit determination results using azimuth and elevation angle from ground tracking data, which has the standard data interface format, GEOS-C. The ground tracking data is very useful for initial orbit determination after a satellite launch. In this paper, the quality of the measurement data has been investigated using a variety of real tracking passes, compared with the high precision orbit data of KOMPSAT-2. The accumulated tracking data from consecutive satellite-ground passes is processed for orbit determination using least square method. The accuracy of orbit determination result is also presented.

#### 초 록

본 논문에서는 지상국에서 추적한 저궤도 위성의 방위각 및 고도각을 관측자료로 이용하여 궤도결정을 수행한 결과를 분석하였다. 지상국 추적 데이터는 발사 후 초기 궤도결정을 위한 관측자료로 유용하게 사용된다. 이를 위해 지상국 추적데이터에 대한 표준 인터페이스 포맷을 정리하였고, 특정 지상국에 대한 추적 데이터의 통계적인 특성을 살펴보았다. 최소자승법을 이용한 궤도결정을 위해 연속되는 교신패스를 통해 얻은 아리랑 2호의 방위각/고도각을 추적하여 관측자료로 이용함으로써 다양한 조합에 따른 궤도결정 결과를 분석하였고, 궤도결정 성능 검증을 위해 GPS 항행해를 이용한 궤도결정 값과 비교하였다.

키워드 : 궤도결정 (orbit determination), 지상국 추적 데이터 (ground track data), 저궤도위성(LEO satellite), 관측자료 (measurement), 최소자승법 (least square method)

#### 1. 서 론

인공위성을 효율적으로 운영하기 위해서는 궤도결정이나 궤도예측과 같은 궤도분석 및 지원

업무가 반드시 요구된다. 궤도결정은 궤도 동역학 모델 및 관측자료를 이용하여 최적의 추정치 (Best Estimate)를 찾아내는 작업이고, 궤도예측은 궤도결정 결과를 이용하여 수치적 또는 해석적인 방법으로 과거 또는 미래의 특정시점에서의

접수일(2011년 1월 8일), 수정일(1차 : 2011년 4월 9일, 2차 : 2011년 6월 14일, 게재 확정일 : 2011년 11월 1일)

\* 저궤도위성관제팀/ocjung@kari.re.kr

\*\* 저궤도위성관제팀/jin5864@kari.re.kr

\*\*\* 저궤도위성관제팀/dwchung@kari.re.kr

\*\*\*\* 위성운영실/ekkim@kari.re.kr

\*\*\*\*\* 위성정보연구센터/hjkim@kari.re.kr

궤도를 계산하는 작업을 일컫는다. 이와 같은 과정을 통해 산출된 위성의 궤도정보는 위성 임무 계획이나 지상국 안테나 운영, 위성 및 지상국 간의 교신계획 산출 등에 직접 이용된다. 따라서 궤도결정의 정밀도 확보는 위성운영에 있어 매우 중요한 요소 중의 하나라 할 수 있다.

인공위성의 궤도결정(Orbit Determination)은 궤도 동역학 모델과 관측자료를 통해 위성의 위치 및 속도를 추정하는 과정이다. 지구 저궤도 위성의 궤도결정에 사용되는 관측자료에는 위성에 탑재된 GPS 수신기 데이터, 지상 추적 데이터 등이 있다. GPS 수신기 데이터에는 GPS 항해해(Navigation Solution)와 GPS 원시 데이터(Pseudo Range, Carrier Phase)가 있고, 지상 추적 데이터에는 지상 관측소에서 위성을 추적하여 얻은 방위각(Azimuth), 고도각(Elevation), 시선거리(Range) 등이 포함된다. 궤도결정의 정밀도를 높이기 위해서는 매우 정밀한 궤도 동역학 모델을 사용해야 할 뿐만 아니라 양질의 관측자료를 확보하는 것이 중요하다. 일반적으로 상용급 지구 저궤도 위성은 GPS 수신기를 탑재하고 있으므로 궤도결정 시에 GPS 수신기 데이터를 주로 사용하지만, 발사 직후 초기운영 과정이나 GPS 수신기가 제대로 작동하지 않는 상황에서는 지상 추적 데이터를 이용한 궤도결정을 수행할 수 있어야 한다. 지상국 추적 데이터를 이용한 궤도결정에 관한 연구는 참고문헌 1-2에서 아리랑 1호 및 2호의 실제 지상추적 데이터를 이용하여 궤도결정 성능 및 궤도예측 성능을 분석한 바 있으며, 참고문헌 3에서는 하나의 지상국으로부터 얻은 각 측정 데이터만을 이용하여 궤도결정 특성을 분석한 바 있다.

본 논문에서는 북극 노르웨이의 스발바드 지상국에서 추적한 아리랑 2호의 방위각/고도각을 관측자료로 이용하여 궤도결정을 수행한 결과를 분석하였다. 이를 위해 지상국 추적데이터에 대한 표준 인터페이스 포맷을 정리하였고, 특정 지상국에 대한 추적 데이터의 통계적인 특성을 살펴보았다. 아리랑 2호의 경우 GPS 수신기를 이용한 궤도결정을 통해 하루 수십 미터 수준의 궤도예측 정밀도를 확보하고 있으므로, 최신 궤도

예측 데이터를 기준궤도로 설정하여 추적데이터의 품질(Quality)을 살펴보았다. 스발바드 지상국은 고위도에 위치하고 있어 궤도마다 관측자료를 확보할 수 있다는 장점이 있다. 궤도결정을 위해 연속되는 교신패스를 통해 얻은 아리랑 2호의 방위각/고도각을 이용하여 궤도결정을 수행함으로써 궤도결정 성능을 파악하였다. 또한, 관측자료 축적에 따른 궤도결정 결과를 분석하였고, 궤도결정 성능 검증을 위해 GPS 항해해를 이용한 궤도결정 값과 비교하였다.

## 2. 개요

### 2.1 기본 궤도역학

인공위성의 궤도 운동은 뉴턴의 운동 법칙과 만유인력 법칙을 근거로 다음과 같은 비선형 미분 방정식의 형태로 표현할 수 있다.

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{\mu_c}{r^3} \mathbf{r} + \mathbf{a}_E + \mathbf{a}_{AD} + \mathbf{a}_S + \mathbf{a}_M + \mathbf{a}_{SP} + \mathbf{T} \quad (1)$$

위 식에서  $\mathbf{r}$  은 위성체의 절대 위치벡터로서 일반적으로 지구 중심 관성 좌표계(ECI: Earth Centered Inertial Frame)를 사용한다. 또한,  $\mathbf{a}$  는 위성체가 처한 궤도 환경, 즉 위성에 작용하는 교란력(Perturbation)으로 비대칭 중력장, 대기 항력, 태양과 달의 인력, 태양 복사압 등을 각각 나타내며,  $\mathbf{T}$  는 위성체 추력에 의한 가속도 성분을 의미한다.

식 1에서 지구 비대칭에 의한 교란력  $\mathbf{a}_E$  는 지구의 형상이 불균일한 질량 분포를 가지고 있으므로, Potential Theory를 이용하여 일반적인 형태로 산출하게 된다. 이를 위한 포텐셜 함수에는 지구 평균반경, 지구중력계수, 위성의 경도와 위도 등이 포함된다. 또한, 지구 저궤도 (Low Earth Orbit)에서 운용되는 인공위성은 지구 대기항력(Aerodynamic Drag)에 의한 교란력이 크게 발생하므로, 대기항력에 의한 교란력  $\mathbf{a}_{AD}$  를 반드시 고려해야 한다. 일반적인 대기항력은 대

기저항계수(Drag Coefficient), 인공위성의 질량 대 면적비, 대기밀도의 함수로 표현된다. 이 외에도 태양과 달의 인력(Third Body Attraction)에 의해 위성에 작용하는 교란력은 지구와 태양 또는 달과의 위치함수로 정의되며, 태양과 달에 대한 Ephemeris는 참고 문헌[4]에 상세히 기술되어 있다. 또한, 위성의 태양 전지판과 위성체 몸체는 태양으로부터 불어오는 입자들이 충돌하여 일정한 방향으로 힘을 가하게 되는데, 이를 태양풍에 의한 교란력(Solar Pressure Perturbation)으로 고려하게 되며, 이는 태양과 위성과의 상대위치, 유효면적(Effective area)이나 반사율과 같은 위성체의 표면 특성, 위성체의 형상 등에 따라 결정된다.

## 2.2 지상국 추적 데이터

위성이 지상국 상공을 통과할 경우, 지상국에서는 안테나를 통해 위성을 추적하면서, 관측자료를 획득할 수 있다. 대표적인 관측자료로는 방위각, 고도각, 그리고 시선거리를 들 수 있다. 방위각과 고도각은 지상국 안테나가 실제 구동한 각도를 의미하며, 시선거리는 지상국에서 송출한 전파가 위성체에 전달되어 다시 지상국으로 돌아오는 데까지 걸리는 시간으로 계산된다. 전 세계적으로 분포한 지상국과 서로 다른 위성들 간의 지상국 추적 데이터를 원활하게 주고받기 위해서는 표준 인터페이스 포맷이 필요하며, 이를 위해 GEOS-C 포맷이 정의되어 있다. GEOS-C 포맷에

표 1. Definition of Common Data of GEOS-C

Column	Description
1-7	Satellite ID
8-9	Measurements type
10-11	Time System indicator (03)
12-16	Reception code number
17-18	GMT, Year
19-21	GMT, DOY(Day Of Year)
22-26	GMT, SEC of Day
27-32	GMT, msec

대한 정의는 표 1 - 표 3에 정리하였다. 표에서 IRC (Ionospheric refraction correction)는 전리층에 대한 굴절보정을, TRC (Tropospheric refraction correction)는 대류권에 대한 굴절보정을 의미한다.

표 2 Definition of Angle Measurement Data of GEOS-C

Column	Description
33	IRC flag
34	TRC flag
36-38	AZ angle, degree
39-40	AZ angle, arc minute
41-45	AZ angle, arc second
47-48	EL angle, degree
49-50	EL angle, arc minute
51-54	EL angle, arc second
58-61	Standard deviation in azimuth
62-65	Standard deviation in elevation
67-71	TRC to azimuth
72-76	TRC to elevation
77	New line character

표 3 Definition of Range Data of GEOS-C

Column	Description
33	IRC flag
34	TRC flag
35	Transponder delay correction flag
36-45	Range value, km
46-54	Range value, m
55	Speed of light
56	Transponder channel
57-60	Surface pressure, millibars
61-63	Surface Temperature, degrees K
64-66	Relative humidity at surface, percent
69-73	Measurement standard deviation
74	Range ambiguity indicator
76-80	TRC
81	New line character

### 3. 궤도결정 분석 및 평가

#### 3.1 궤도결정

초기시점에서의 위성의 위치 및 속도가 주어지면 위성의 동역학 모델을 사용하여 특정시점에서의 위성의 위치를 예측할 수 있다. 하지만 실제로는 초기시점에서의 위성의 위치 및 속도정보를 정확하게 알 수 없을 뿐만 아니라 동역학 모델의 부정확성으로 인해 예측된 값은 근사적인 위치 및 속도를 나타낸다. 따라서 위성의 실제 운동을 정밀하게 결정하기 위해서는 관측자료가 필요하며, 이를 통해 위성 궤적에 대한 최적의 예측치(Best Estimate)를 산출 가능하다. 하지만 관측자료에는 시스템 오차나 랜덤 오차가 포함되므로 최적의 예측치는 실제궤도(True Orbit)와는 다를 수 있다. 그림 1은 지상국 안테나에서 획득한 방위각 및 고도각을 이용한 궤도결정 개념을 도시한 것으로 공칭궤적(Nominal Trajectory)은 궤도예측 값을 나타내며, 추정궤적(Estimated Trajectory)은 지상국 추적 데이터를 통해 찾아낸 값을 나타낸다. 또한, 지표면 상의 지상 추적소를 기준으로 북쪽방향이  $y_t$ , 동쪽방향이  $x_t$ , 그리고 지표면 수직방향이  $z_t$ 인 좌표계에서 방위각과 고도각의 관계는 아래와 같고,  $\vec{r}_t$ 는 위성의 위치벡터이다.

$$\sin(Elevation) = \frac{z_t}{|\vec{r}_t|} \quad (2)$$

$$\tan(Azimuth) = \frac{x_t}{y_t} \quad (3)$$

본 논문에서는 연속되는 세 궤도에서 얻은 아리랑 2호에 대한 스발바드 지상국의 방위각/고도각을 이용하여 관측자료의 특성을 살펴보고, 궤도결정 결과를 각각 분석하였다.

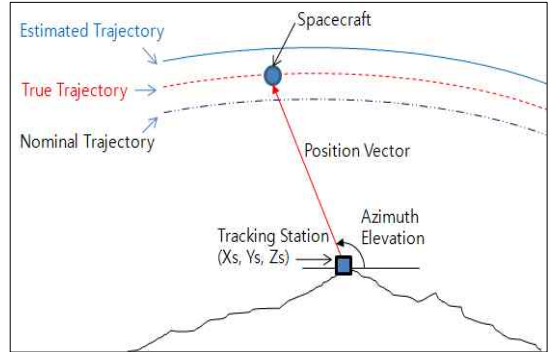


그림 1. Geometry for Orbit Determination

#### 3.2 관측자료 특성 분석

본 논문에서 고려한 스발바드 지상국은 북극 근처에 위치하고 있어, 거의 매 궤도마다 지상추적이 가능하다는 장점이 있다. 본 논문에서 고려한 스발바드 지상국의 좌표정보는 표 4와 같다. 궤도결정에 사용한 데이터는 총 9가지이며, 하루 중 연속 3패스에 대하여 총 3일치 관측자료를 이용하였다. 표 5에는 고도각 5도 기준으로 관측데이터의 날짜 및 궤도번호, 시작 및 종료시간을 각각 나타내었다.

그림 2는 패스번호 26268 (Case No. 1)에 대한 방위각 및 고도각과 정밀궤도예측자료로부터 계산한 값과의 차이를 나타낸 것이다. 이 패스는 최대 고도각이 10도 미만으로, 방위각 오차는 최대 0.0693도, 고도각 오차는 최대 0.2395도를 나타낸다. 반면에 그림 3은 패스번호 26338 (Case No. 6)에 대한 각도 차이를 나타낸 것으로, 최대 고도각 근처에서 방위각 오차가 크게 발생하고 있는데 이는 지상국 안테나 구동 특성 때문이다.

관측자료에 대한 통계 특성치는 표 6에 정리하였다. 높은 고도각을 갖는 경우 방위각의 최대 오차가 크게 발생하지만, 모든 패스에 대하여 방위각 평균 오차는 0.02도에서 0.06도로 0.1도 미만이며, 고도각 평균 오차는 0.06도에서 0.21도 사이에 형성됨을 확인할 수 있다.

표 4 Location of Ground Station

Category	Value
Latitude(deg.)	78.225771
Longitude(deg.)	15.405742
Height (meters)	500.791
ECF_X(km)	1258.87419
ECF_Y(km)	346.88745
ECF_Z(km)	6222.61887

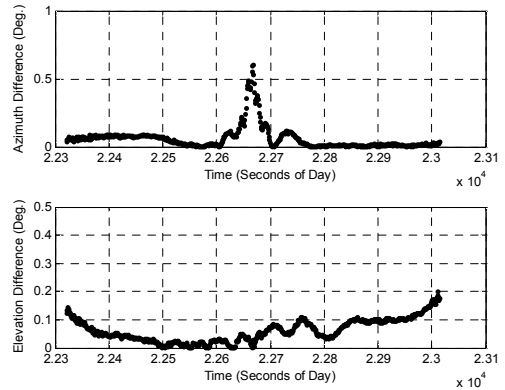


그림 3. Azimuth & Elevation Difference (Case No. 6)

표 5 Angle Measurement Data

No.	Orbit	Date	Start Time	End Time
1	26268	2011-07-02	12:31:18	12:37:52
2	26269		14:12:20	14:16:44
3	26270		15:52:16	15:57:01
4	26336	2011-07-05	02:57:18	03:08:40
5	26337		04:34:32	04:46:00
6	26338		06:12:01	06:23:34
7	26336	2011-07-07	02:36:47	02:48:10
8	26337		04:14:00	04:25:27
9	26338		05:51:24	06:02:58

표 6 Angle Data Characteristics

No.	Max. AZ_Diff	Max. EL_Diff	Mean AZ_Diff	Mean EL_Diff	Max. EL
1	0.0693	0.2395	0.0270	0.1955	9.37
2	0.0601	0.2419	0.0299	0.2141	6.61
3	0.0849	0.2388	0.0314	0.1989	6.95
4	0.1511	0.2194	0.0363	0.0659	57.79
5	0.1922	0.2213	0.0392	0.0663	67.71
6	0.6019	0.1996	0.0612	0.0623	82.47
7	0.1716	0.2125	0.0482	0.0629	57.90
8	0.1988	0.2137	0.0607	0.0634	64.08
9	2.1314	0.2047	0.0390	0.0655	89.65

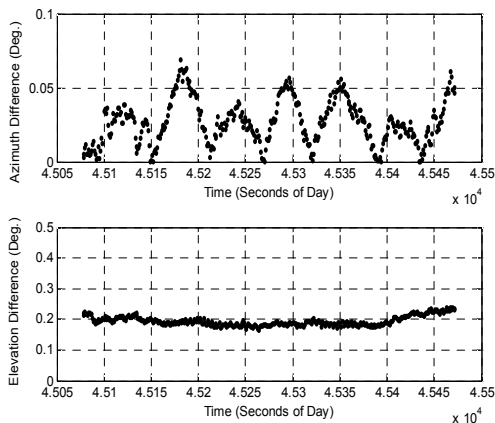


그림 2. Azimuth & Elevation Difference (Case No. 1)

### 3.3 결과분석

최소자승법을 이용한 궤도결정을 위해 연속되는 교신패스에서 얻은 관측자료(지상국 추적 데이터를) 이용하였다. 그림 4에는 관측자료 및 궤도결정 범위를 나타낸 것으로, 각 날짜에 대하여 동일한 초기조건을 이용하여 1-패스에 대한 관측자료만을 이용할 경우(OD #1)와 2-패스에 대한 누적 관측자료를 이용할 경우(OD #2), 그리고 3-패스에 대한 누적 관측자료를 모두 이용할 경우(OD #3)에 대한 궤도결정을 수행하였다. 실제 아리랑 2호의 궤도주기는 약 98분으로, 관측자료는 한 궤도에서 최소 300여개 (약 4분 30초 분량

의 데이터), 최대 700여개 (약 11분 분량의 데이터)가 된다. 그림 5에는 관측자료의 누적개수를 나타내었다. 관측자료의 개수는 위성 추적시간, 즉 고도각에 따라 달라지며, 궤도결정 결과에 영향을 주게 된다. 그림 6은 궤도결정(OD #7 - OD #9)에서 고려한 위성의 초기 위치와 지상국 추적과 지상국 추적 구간을 도시한 것이다.

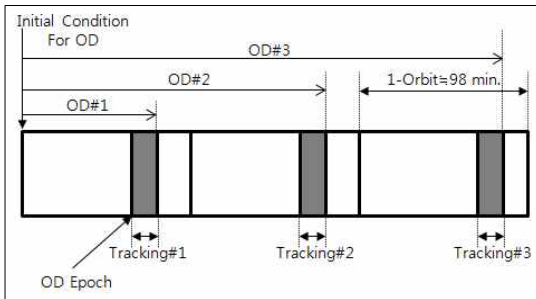


그림 4. 관측자료 구간 및 궤도결정 범위

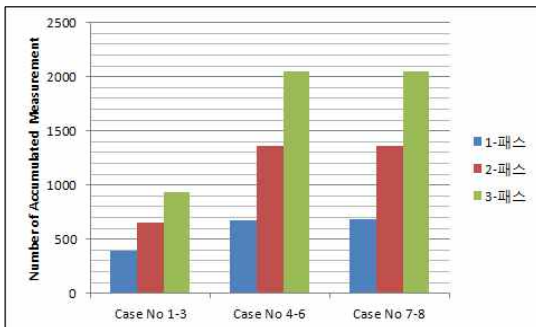


그림 5. 지상국 추적 데이터 관측자료 개수

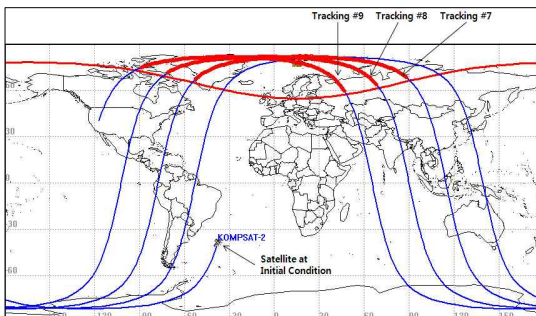


그림 6. 위성 위치 및 지상국 추적 패스 지상궤적

지상국 추적 데이터를 이용한 궤도결정 정밀도를 확인하기 위하여, 동일한 초기조건을 적용하되 하루 분량의 GPS 항행해를 이용한 궤도결정 결과와 비교하였다. 하루치 GPS 항행해를 이용한 아리랑 2호의 궤도결정 정밀도는 수 미터 수준으로 알려져 있다[5]. 표 7은 GPS 항행해를 이용한 궤도결정 결과와 지상국 추적 데이터를 이용한 궤도결정 결과의 차이를 궤도요소별로 나타낸 것이다. 표를 통해 1-패스에 대한 관측자료만을 이용할 경우 궤도결정 결과를 신뢰할 수 없음을 확인할 수 있다. 또한, 관측자료가 상대적으로 적은, 즉 지상국과 위성간의 고도각이 낮은 패스에 해당하는 OD #1 - OD #3은 관측자료가 많은 패스를 이용할 경우에 비해 궤도결정 정밀도가 떨어진다. 궤도결정을 통해 방위각 평균오차가 0.1도 미만이고 고도각 평균오차가 0.2도 미만일 때, 최소 2-패스의 각도 데이터를 이용하면 정밀한 궤도결정이 가능함을 확인할 수 있다.

표 7 Difference of Orbit Determination Results

OD#	$\Delta a$	$\Delta e$	$\Delta i$	$\Delta OM$	$\Delta w$	$\Delta M$
1	-250.59	-0.030	-0.195	0.086	262.0	-262.7
2	0.18	0.000	0.049	0.067	48.2	-48.2
3	0.17	0.000	0.048	0.057	50.5	-50.6
4	-139.19	-0.017	0.029	-0.011	245.2	-245.7
5	-0.04	0.000	0.003	-0.003	0.7	-0.6
6	-0.03	0.000	0.001	-0.008	1.8	-1.8
7	-138.68	-0.017	0.029	0.025	232.4	-233.0
8	-0.05	0.000	0.005	0.029	-2.8	2.8
9	-0.02	0.000	0.004	0.026	-1.7	1.8

- unit: a(km), i, OM, w, M (deg.)

## 4. 결 론

본 논문에서는 지상국에서 추적한 저궤도 위성의 각도 데이터를 이용하여 궤도결정을 수행한 결과를 분석하였다. 이를 위해 지상국 추적데이터에 대한 표준 인터페이스 포맷을 정리하였고, 북극 근처에 위치한 스발바드 지상국에 대한 관

측자료의 통계적인 특성을 살펴보았다. 또한, 연속되는 패스를 통해 얻은 아리랑 2호의 방위각 및 고도각을 추적하여 관측자료로 이용함으로써 궤도결정 결과를 분석하였고, 궤도결정 성능 검증을 위해 GPS 항행해를 이용한 궤도결정 값과 비교하였다. 궤도결정에는 일괄처리 방식인 최소자승법을 이용하였으며, 최소 2패스의 각도 추적 데이터를 이용하면 정밀한 궤도결정이 가능함을 확인하였다. 지상국 추적 데이터는 발사 후 초기 궤도결정에 유일한 관측자료임을 감안하여, 향후에는 초기조건 및 관측자료 불확실성에 따른 궤도결정 정밀도 특성을 상세히 분석할 계획이다.

## 참 고 문 헌

1. 김해동, 김은규, 최해진, “발사초기 제한된 지상추적 데이터를 이용한 궤도결정 및 궤도에측 성능분석”, 한국항공우주학회 2003년도 추계학술대회 논문집, 2003.
2. 김해동, 정옥철, 김은규, 방효충, “아리랑 2호 초기궤도결정 분석”, 한국항공우주학회 2006년도 추계학술대회 논문집, 2006.
3. 이병선, 황유라, “하나의 지구국으로부터 얻은 각 측정 데이터만을 이용한 저궤도위성의 궤도결정”, 한국항공우주학회 2004년도 추계학술대회 논문집, 2004.
4. Battin, Richard H, An Introduction to the Mathematics and Methods of Astrodynamics, AIAA, 1987.
5. 김해동, 정옥철, 김은규, “아리랑위성 2호 초기 운용 및 임무기간 중 궤도분석”, 한국항공우주학회지, 제 38권, 제 9호, pp. 914-924, 2010.