

## 論文

## 도플러 효과를 이용한 단일 저궤도위성의 동물추적시스템 개발

이정남\*, 이병훈\*, 문병영\*, 장영근\*\*

## Animal Tracking System Using the Doppler Effect for Single LEO Satellite

Jeong-Nam Lee\*, Byung-Hoon Lee\*, Byoung-Young Moon\* and Young-Keun Chang\*\*

## ABSTRACT

Position determination accuracy is strongly depending on how much precisely and frequently satellite receiver measures transmitted signals from terminals on target animals when Doppler effect is applied for position determination. ARGOS satellite system has shown relatively high position determination accuracy by operating multiple satellites, which enable operator to get more Doppler shift data from terminals. In case of animal tracking mission with single satellite, however, it is difficult for the satellite receiver to receive transmitted signals from terminals frequently during short period that satellite passes over ground terminals. This is one of the main sources to decrease position accuracy on target animals. In this paper, the Doppler rate estimation is implemented to increase the number of Doppler shift data received by single satellite. It is proved that the relatively high position determination accuracy with increased number of estimated data can be obtained. We also suggest that the Doppler rate estimation is applicable for position determination system with single satellite.

## 초 록

도플러 효과를 이용해서 동물의 위치를 추적하는 경우 동물에 장착된 단말기의 송신 신호를 위성의 수신기에서 얼마나 많이, 정확하게 측정하느냐에 따라 위치 추적의 정밀도가 달라진다. ARGOS 위성시스템의 경우 다수의 위성을 운용하여 단말기의 송신신호를 비교적 많이 측정하며, 이러한 많은 측정 데이터를 이용해서 상당히 높은 위치추적 정밀도를 유지하고 있다. 하지만 단일 위성을 사용하는 동물추적시스템의 경우 위성이 단말기를 통과하는 짧은 시간동안 송신 신호를 많이 측정하기 힘들며, 이는 위치추적의 정밀도를 떨어뜨리는 가장 큰 원인이 된다. 따라서 본 논문에서는 단일 위성에서 도플러 천이 측정 데이터의 개수를 증가시키기 위해서 도플러 천이 변화율을 이용하여 수신 데이터를 추정하였으며, 추정된 데이터를 측정치로 사용하여 측정 데이터의 개수를 증가 시켰다. 결과적으로 도플러 천이 변화율을 이용하여 비교적 높은 위치추적 정밀도를 획득 할 수 있으며, 단일 위성을 사용하는 동물추적시스템에 적합한 방식임을 알 수 있다.

**Key Words** : Doppler Effect(도플러 효과), Animal Tracking System(동물추적시스템), GPS Receiver(GPS 수신기), Terminal(단말기)

† 2006년 7월 27일 접수 ~ 2006년 10월 16일 심사완료

\* 정회원, 한국항공대학교 대학원

\*\* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부  
연락처, E-mail : ykchang@hau.ac.kr  
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

## I. 서 론

인공위성을 이용한 동물의 위치 추적은 1969년 미국 NASA의 기상위성을 이용하여 처음으로 실

시되었으며 1978년 ARGOS(Advanced Research and Global Observation Satellite) 시스템 도입과 더불어 본격적으로 발전하면서 전 세계 동물생태 학자들에게 중요한 연구 결과를 제공해 오고 있다 [1]. 비록 GPS가 운용되면서 매우 정밀한 위치 측정이 가능하게 되었지만 동물 추적 분야에 있어서 ARGOS 시스템은 여전히 다방면으로 사용되고 있다. ARGOS 시스템의 동물 위치추적 방식은 위성과 단말기 사이의 상대속도의 영향으로 발생하는 도플러 효과를 이용한다. 도플러 효과를 이용하는 경우 GPS가 부착된 단말기에 비해서 위치추적 정밀도는 떨어지지만 단말기의 경량화를 통한 소형 동물 위치추적에 많이 사용된다.

현재 한국항공대학교 우주시스템 연구실(SSRL)에서 개발 중인 나노위성 HAUSAT-2는 주요 탑재체로 동물추적시스템(ATS: Animal Tracking System)을 탑재하고 있다. 동물추적시스템은 위성에 탑재되는 동물추적 수신기(ATSR : Animal Tracking System Receiver)와 동물에 장착되는 동물추적 단말기(ATT : Animal Tracking Terminal) 및 위성으로부터 수신된 데이터를 처리하고 그 결과를 사용자에게 제공해 주기 위한 지상국으로 구성되어 있다. 특히 동물에 장착되는 단말기의 경우 GPS 수신기가 장착된 단말기(ATT\_G)와 GPS 수신기가 없는 단말기(ATT\_D) 두 가지 모델을 동시에 개발하고 있다. ATT\_G 모델과는 달리 ATT\_D의 경우 GPS 수신기가 없기 때문에 도플러 효과를 사용하여 동물의 위치를 추적하며, 이러한 경우 ATT\_G에 비해서 위치추적 알고리즘이 복잡해진다[2].

도플러 효과를 이용한 동물의 위치추적의 경우 위치추적 정밀도에 영향을 미치는 다양한 요소가 있으며, 특히 단말기로부터 수신되는 도플러 친이 데이터(혹은 메시지)의 개수가 위치추적 정밀도에 가장 많은 영향을 미친다[1-3]. 기존 ARGOS 시스템의 연구결과에서 밝히듯 이론적으로 최소 2개의 측정치가 있으면 단말기의 위치를 결정할 수 있지만, 실제적으로 5개 이상의 측정치가 필요하다[1]. 그래서 ARGOS 시스템은 측정 데이터 개수를 늘리기 위해서 2기 혹은 경우에 따라 3기의 위성을 함께 사용하여 동물에 장착된 단말기로부터 송신되는 주파수를 측정한다. 하지만 HAUSAT-2 ATS의 경우 가용위성이 1기 이므로, 한기의 위성이 단말기를 지나가는 시간동안 최소 5개 이상의 정확한 데이터를 수신할 필요가 있으며, 이는 위성이 평균 7분 정도에 단말기를 통과하므로 단말기의 송신주기가 1분, 즉 1분에 한번씩 송신한다면 70% 이상의 수신 성공률을 가져야 함을 의미한다.

즉 대부분의 도플러 데이터가 정확하게 수신되어야 함을 의미한다. 하지만 단말기를 장착한 동물이 수신 불가능지역으로 들어가거나 기상환경 등의 영향으로 측정 데이터가 5개 보다 적을 경우가 많으며, 보다 정밀한 위치추적을 위해서 5개 이상의 측정 데이터가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 ARGOS 시스템과는 달리 HAUSAT-2와 같이 1기의 위성으로 보다 정밀한 단말기 위치추적을 위해서 도플러 친이 변화율(Doppler shift rate)을 이용해서 도플러 친이를 추정하는 방식을 제안하였으며, 시뮬레이션을 통해 그 결과를 검증하였다.

## II. HAUSAT-2 동물추적시스템

서론에서 언급한 동물추적시스템의 운용개념을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 보듯이 HAUSAT-2 동물추적시스템은 위성에 탑재되는 동물추적 수신기(ATSR : Animal Tracking System Receiver)와 동물에 장착되는 동물추적 단말기(ATT : Animal Tracking Terminal) 및 지상국으로 구성되어 있다.

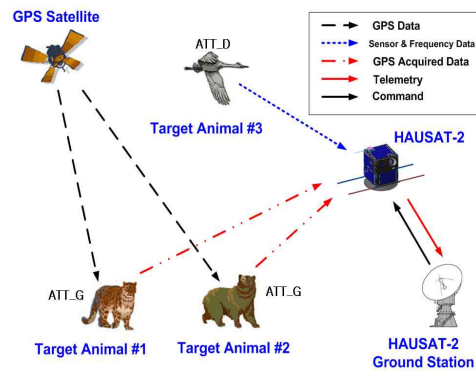


그림 1. ATS 운용 개념도

### ATSR(Animal Tracking System Receiver)

ATSR의 경우 HAUSAT-2 위성에 탑재되며, 그림 2의 전기적 인터페이스에서 보듯이 145.860 MHz의 VHF 대역 FSK(Frequency Shift Keying) 신호를 수신할 수 있도록 설계되었으며, 예비 시스템을 가지고 있어 임무기간인 1년 동안 지속적이고 신뢰성 있는 임무 수행이 가능하다. 수신기는 디지털 회로부와 RF 회로부로 구성되어 있다. RF 회로부는 임무에 신뢰성 향상을 위하여 예비 시스템을 채택하고 있으며 주 시스템과 부 시스템이 동시에 동작하도록 설계되어 있다. 단말기로부터 수신된 데이터는 저 잡음 증폭기와 수신

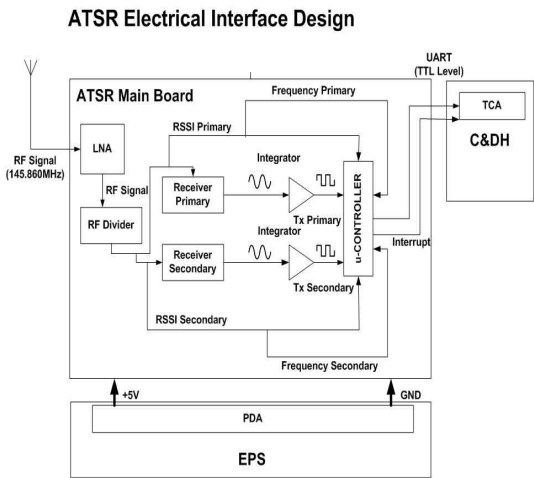


그림 2. ATSR 전기적 인터페이스

기, 저 대역 통과 필터를 거쳐 디지털 회로부의 마이크로 컨트롤러로 전송되게 된다. 주 시스템과 부 시스템에서 각각 전송되어온 신호강도 측정 라인은 마이크로 컨트롤러의 A/D 변환기에 연결되며, 마이크로 컨트롤러는 신호 강도를 측정 후 신호 세기가 큰 신호만을 선택하여 데이터를 처리한다. 이렇게 처리된 데이터는 인터럽트 신호와 함께 데이터 및 명령 처리계(C&DH; Command & Data Handling Subsystem)로 전송된다.

**ATT(Animal Tracking Terminal)**

동물추적 단말기는 동물에 직접 부착되어야 하는 만큼 무게에 많은 제약을 가진다. 비교적 개체 크기가 큰 포유동물의 경우 개체 무게의 10% 이내의 무게를 가진 단말기를 부착하면 문제가 없기 때문에 상대적으로 단말기 무게에 큰 제약을 받지 않는다. 반면, 조류의 경우에는 개체 무게가 포유동물에 비하여 가볍기 때문에 단말기 무게에 큰 제약이 따르게 되며 일반적으로 개체 무게의 5% 이내의 단말기를 부착해야 대상 동물이 이상 행동을 보이지 않는 것으로 알려져 있다.

표 1에서 보듯이 현재 SSRL 에서 개발되고 있는 단말기의 경우 GPS 수신기가 장착된 모델(ATT\_G)과, GPS 수신기가 없는 모델(ATT\_D) 두 가지가 있다. ATT\_G 모델의 경우 GPS를 이용한 매우 정밀한 위치추적이 가능하나 GPS로 인해 단말기의 무게가 증가하고 전력소모가 크다는 단점이 있다. 따라서 단말기 무게에 큰 영향을 받지 않는 비교적 큰 포유동물에 적합하다. 반면 ATT\_D의 경우 도플러 효과를 이용한 위치추적

방식을 사용하므로, 위치추적 알고리즘이 GPS에 비해 복잡하며, 위치추적 정밀도가 떨어진다. 하지만 전력소모가 적고, 경량화 할 수 있는 장점이 있어 조류와 같은 소형 동물에 적합하다.

표 1. ATT(Animal Tracking Terminal) 사양

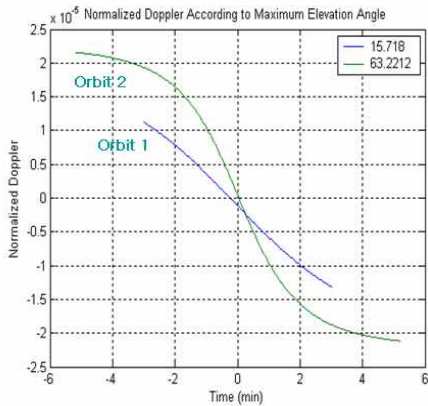
항 목	ATT_G	ATT_D
수 명	238 days	330 days
총 무게	295 g	185 g
- 배터리	100 g	25 g
- GPS 수신기	35 g	-
- 컨트롤러, 센서, Tx, HPA	50 g	50 g
- Housing, 안테나, Collar	110 g	110 g

- \* ATT\_G Battery : 리튬 이온 배터리 (2200mAh x 2, 동작전압 5V)
- \* ATT\_D Battery : 리튬 이온 배터리 (1200mAh x 1, 동작전압 5V)
- \* ATT\_G : HAUSAT-2와 1일 2회 접속, 1회 접속 시 3회 송신 기준.
- \* ATT\_D : HAUSAT-2와 1일 2회 접속, 1회 접속 시 8회 송신 기준.

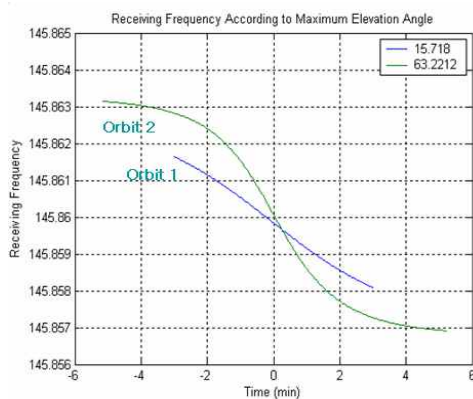
동물추적 단말기는 안테나, RF 변조기, 증폭기, 송신 데이터 생성 로직, 발진기, 전력부, GPS 수신기(ATT\_G)등으로 구성되며, 145.860 MHz의 반송파 주파수를 가지고 위성이 단말기의 위치를 통과하는 예상시간 동안 일정한 주기로 데이터를 송신한다. 이 주기를 반복주기(Repetition Period)라고 하며, 추적 대상 동물과 임무기간에 따라 달라진다. 현재 HAUSAT-2 단말기의 경우 반복 주기는 60초로 할당되어 있으며, 단말기 수명을 극대화하기 위해서 위성의 접근시간을 추정하여 자동으로 스위치를 개폐(On-off) 할 수 있도록 프로그래밍 되었다.

**III. 저궤도 위성의 도플러 천이 특성**

GPS 수신기가 장착된 단말기의 경우 매우 정밀하게 동물의 위치를 추적할 수 있다. 하지만 앞서 언급했듯이 GPS 수신기의 장착으로 단말기의 무게가 크게 증가하며, 전력소모도 크게 된다. 따라서 조류와 같은 소형동물에 장착하기에 적합하지 않다. 따라서 HAUSAT-2에서는 GPS 수신기 없이 도플러 효과를 이용한 동물추적 방법을 사용하기 위해서 GPS 수신기가 없는 ATT\_D를 개발하였으며, 그에 따른 위치추적 알고리즘을 분석하였다.



a) 최대 양각에 따른 도플러 천이



b) 최대 양각에 따른 수신 주파수

그림 3. LEO 위성의 도플러 천이 및 수신주파수 특성(S-Curve)

도플러 효과를 이용 동물에 장착된 단말기의 위치를 추적하기 위해서 먼저 저궤도 위성과의 단말기 사이의 도플러 천이의 특성을 분석하였다. 위성이 단말기에 접근할 때 위성 수신기에서 수신되는 주파수는 단말기의 반송파 주파수 보다 높으며, 반대로 위성이 단말기에서 멀어져 갈 때는 단말기의 반송파 주파수 보다 낮은 주파수가 수신된다. 이를 도플러 효과라고 하며, 위성과 단말기의 상대운동에 의해 발생한다[1,4,5]. 도플러 현상에 의한 주파수 천이  $\Delta f$ 는 다음 식(1)과 같이 반송파 주파수에 비례하고 송신기와 수신기의 상대속도와 전파 속도의 비율만큼 천이된다.

$$\Delta f = \frac{f_t}{c} \times v \quad (1)$$

여기에서  $f_t$ 는 반송파 주파수이며,  $c$ 는 광속,  $v$ 는 위성과 단말기간의 상대속도이다.

저궤도 위성의 경우 위성에서 관측되는 도플러 천이는 위성과 단말기 사이의 최대양각(Maximum Elevation Angle)에 따라 S형태의 곡선(S-Curve)을 보인다[1,4,5]. 그림 3은 단말기의 위치가 위도 37°, 경도 128°에 위치하고, 최대 양각이 15°와 63°일 때의 도플러 천이의 시간에 따른 변화, 즉 S-Curve를 보여준다. 이때 위성의 궤도는 HAUSAT-2의 궤도인 고도 650km, 궤도 경사각 98°의 태양 동기궤도이며, 단말기에서 위성을 관측할 수 있는 최소 양각은 10°로 가정하였다. 시간 축은 위성과 단말기의 양각이 최대가 되는 지점, 즉 제로 도플러 순간에서 상대적으로 표현 하였다. 그림 3(a)에서 보듯이 최대 양각이 클수록 도플러 천이가 커지며, 특히 양각이 63°의 경우  $\pm 3$  kHz의 폭으로 수신주파수가 천이되는 것을 그림 3(b)를 통해 알 수 있다. 위성 관측 기간도 최대 양각이 클수록 길어진다. 최대양각이 63°인 경우 관측 기간은 약 10분 정도이며, 최대양각이 15°인 경우는 약 6분 정도이다.

#### IV. 도플러를 이용한 위치추적 방법

일반적으로 위성 통신시스템에서의 도플러 현상은 신호의 위상을 심하게 왜곡해서 수신단의 성능을 크게 저하시킨다. 따라서 도플러 천이에 의한 성능 저하를 최소화하는 보상 기술을 필요로 한다. 하지만 이러한 도플러 효과는 동물추적 시스템에서 동물의 위치를 결정하는데 유용하게 사용될 수 있으며, 기본적인 원리를 다음 그림 4에 나타내었다.

먼저 그림 4에서 보듯이 위성의 속도 벡터( $V$ )와 단말기와의 상대속도 벡터가 이루는 각을 반각( $A$ )으로 하는 원뿔을 그리면 단말기가 위치한 고도면과 원뿔이 접하는 두 지점이 생긴다. 이 두 지점은 위성의 지적선(Ground Track)에 대칭으로 존재하며 이 중 한 점이 실제 단말기의 위치가 된다. 본 논문에서는 실제 단말기의 위치를 나타내는 지점을 실제 위치(True Location)라 부르며, 또 다른 한 지점은 허상 위치(Mirror Location)라 부른다. 원뿔을 그리기 위한 반각( $A$ )의 크기는 식(1)의 도플러 식을 이용하여 구할 수 있다.

그림 4에서 알 수 있듯이 위성의 속도와 단말기와의 상대속도의 관계는 다음 식(2)와 같이 표현된다.

$$v = V \cos A \quad (2)$$

또한 식(2)를 식(1)에 대입하면, 최종적으로 원

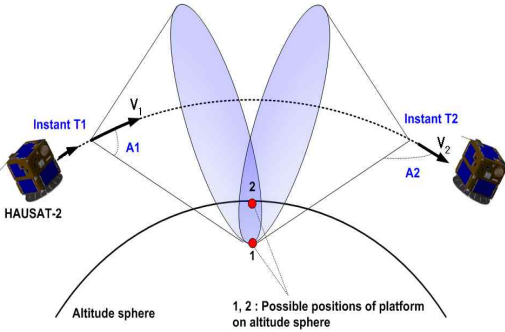


그림 4. 도플러 천이를 이용한 단말기의 위치추적 원리

궤도의 반각(A)는 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\cos A = \frac{\Delta f c}{V f_t} = \frac{(f_r - f_d) c}{V f_t} \quad (3)$$

여기에서  $f_r$ 은 위성에 장착된 수신기에서 측정된 반송파의 수신주파수이다. 위성의 속도(V)는 저궤도 위성 해석에 적합한 SGP 궤도모델을 사용하여 구하였다[6]. 또한 SGP 궤도모델의 초기 입력값, 즉 궤도요소는 NORAD에서 제공하는 TLE(Two-Line Element)데이터를 이용하였다[7].

**허상 위치의 제거**

실제 위치를 구하기 위해서는 먼저 허상 위치를 제거해야 한다. 허상 위치는 과거의 단말기 위치와 속도, 지구 자전속도 등을 고려하여 제거할 수 있으며, 또한 각각의 원뿔이 단말기가 위치하고 있는 고도면과 만나는 지점의 집중도를 이용하여 제거할 수 있다. 집중도를 이용하기 위해서는 최소 2개 이상의 원뿔, 즉 최소 2개 이상의 도플러 천이 측정치가 필요하다. 그림 5는 단말기의 위치가 위도 37°, 경도 128°에 위치하고 최대 양각이 15°이며 위성이 통과하는 동안 도플러 측정치가 5개인 경우의 시뮬레이션 결과이다. 그림 5에서 보듯이 원뿔과 단말기가 위치한 고도면과 만나는 지점이 대칭으로 생성되며, 실제 단말기가 있는 위치에서는 위치의 집중도가 높으며, 허상 위치에서는 위치가 분산되어 있음을 알 수 있다. 따라서 위치 집중도가 높은 지점을 실제 단말기의 위치로 추정할 수 있다.

**위치추적 오차의 주요 요인**

앞의 그림 5의 도플러 효과를 이용한 단말기 위치추적의 결과는 송/수신 주파수가 안정적이고, 단말기의 경우 위성이 통과하는 동안 움직이지

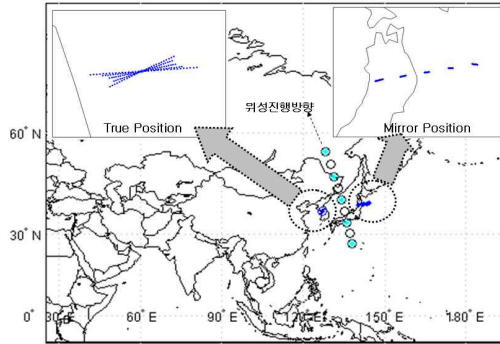


그림 5. 실제위치와 허상 위치의 비교

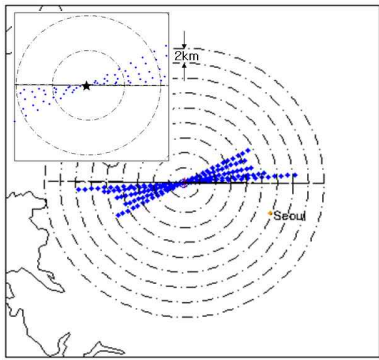
않으며, 단말기의 고도를 알고 있다고 가정한 이상적인 경우로 이러한 경우에는 매우 정확하게 단말기의 위치를 결정할 수 있음을 알 수 있다. 하지만 실제의 경우 송/수신 주파수는 단말기와 위성 수신기의 성능에 따라서 주파수 에러가 존재한다. 또한 동물에 장착된 단말기는 항상 속도를 가지고 이동하고 있으며, 단말기의 고도도 동물의 움직임에 따라 달라짐으로 정확한 고도를 알 수 없다. 이러한 요인들은 위치추적 정밀도에 큰 영향을 미치며, 따라서 오차요인들에 대한 정확한 분석이 필요하다.

먼저 위치추적에 영향을 미치는 주파수 에러는 대부분 단말기에 장착된 발진기(Oscillator)의 안정성( $\frac{\Delta f}{f}$ )에 의해 주파수 에러의 크기가 결정된다. 발진기의 안정성은 온도변화에 민감하며, 1개의 반송파 송신시간 동안의 안정성을 의미하는 short-term 안정성과 위성이 단말기를 통과하는 시간동안의 medium-term 안정성, 위성이 한 주기를 도는 시간동안의 long-term 안정성으로 구분되어진다. 특히 도플러를 이용한 단말기 위치추적의 경우 medium-term 안정성이 중요하다. 따라서 위치추적 정밀도를 높이기 위해 ultra-stable 발진기를 사용하기도 하지만 매우 비싸고 전력소모가 큰 단점이 있다. 그래서 표준 발진기에 잘 단열된 하우징을 사용하기도 한다.

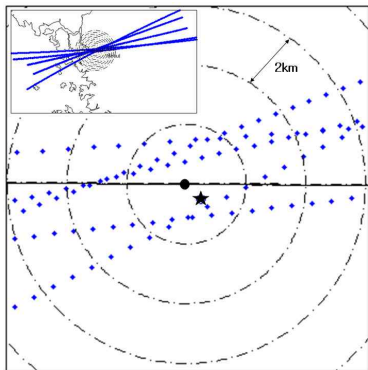
medium-term 안정성이 위치추적에 미치는 영향을 알아보기 위해서 medium-term 안정성이 10~50Hz까지 변할 때 도플러 천이 특성과 위치추적 정밀도 결과를 시뮬레이션 하였으며, 그 결과를 그림 6에 도시하였다. 그림 6(a)의 이상적인 경우와는 달리 그림 6(b)부터 6(e)까지의 결과에서 보듯이 medium-term 안정성에 따라 위치추적 정밀도가 상당히 달라짐을 알 수 있다. 특히 그림 6(e)에서 보듯이 안정성이 50Hz의 경우 위

치추적 정밀도가 20km 이상으로 이러한 경우에는 추정된 위치가 의미가 없다. 반면 안정성이 30Hz의 경우 위치추적 정밀도가 10km 이하로 상당히 높은 위치추적 정밀도를 보여준다. 실제로 철새와 같이 상당히 멀리 이동하는 조류의 이동루트를 추적한다면 10km 이하의 위치추적 정밀도는 의미 있는 값으로 사용될 수 있다.

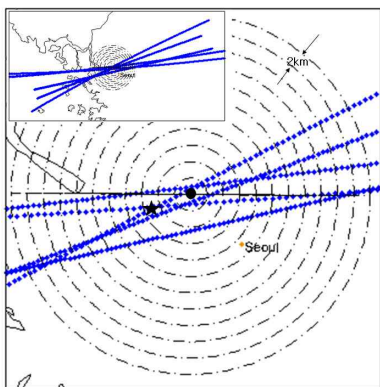
단말기 위치추적에 영향을 미치는 또 하나의



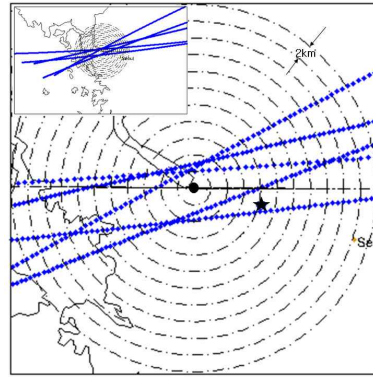
a) No Random Noise (위치오차 : 0km)



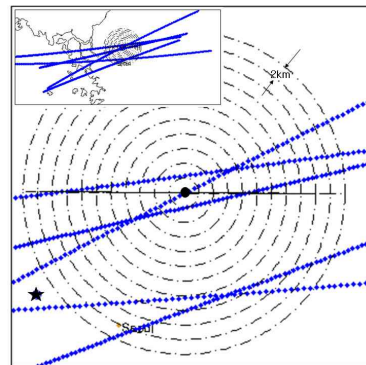
b) 10Hz Random Noise (위치오차 : <1km)



c) 20Hz Random Noise (위치오차 : <5km)



d) 30Hz Random Noise (위치오차 : <9km)

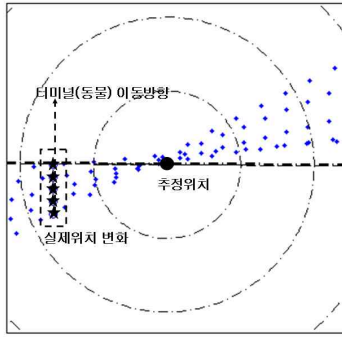


e) 50Hz Random Noise (위치오차 : >20km)

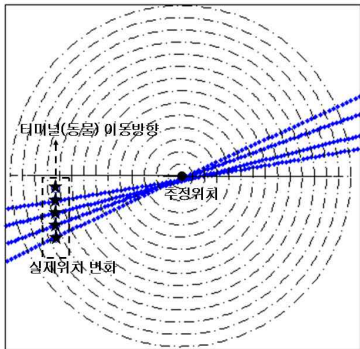
그림 6. Medium-term 안정성에 따른 위치추적 정밀도 (★: 실제위치, ●: 추정위치)

요인은 단말기의 속도이다. 동물에 장착된 단말기의 경우 동물의 움직임에 따라 항상 임의의 속도로 움직인다. 따라서 단말기와 위성의 상대속도가 단말기가 정지된 경우와는 다르다. 따라서 도플러 천이 특성이 달라지며, 위치추적 정밀도에도 영향을 미친다. 그림 7은 동물이 10km/h와 60km/h로 북쪽(위도방향)으로 움직일 때 즉 단말기의 속도가 10km/h와 60km/h일 때 위치추적 결과를 나타내고 있다. 그림 7에서 알 수 있듯이 동물이 10km/h로 움직이는 경우 위치정밀도가 약 4km 이하이며, 반면 동물이 60km/h로 움직이는 경우 위치정밀도가 24km 이하로 나타난다. 즉 단말기의 속도가 증가할수록 위치추적 정밀도는 낮아지며, 반대로 단말기의 속도가 감소할수록 위치추적 정밀도는 향상된다.

위치추적 정밀도에 영향을 미치는 또 다른 요인은 위성이 통과하는 동안 측정된 도플러 천이 데이터(혹은 메시지) 개수 이다. 이론적으로 최소 2개의 측정치가 있으면 단말기의 위치를 결정할



a) 단말기의 속도 10km/h (위치오차 : < 4km )



b) 단말기의 속도 60km/h (위치오차 : < 24km )

그림 7. 단말기의 속도에 따른 위치추적 정밀도 (★: 실제위치, ●: 추정위치)

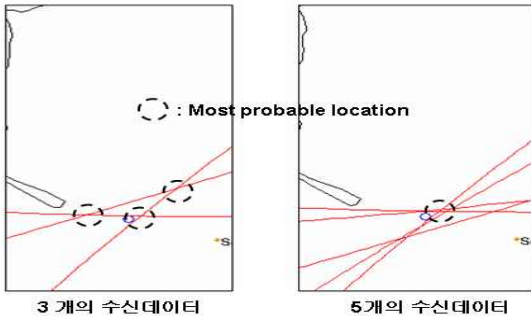


그림 8. 측정 데이터 개수에 따른 추정가능 위치 분포

수 있지만, 실제적으로 5개 이상의 측정치가 필요하다[1,3]. ARGOS 시스템의 경우 측정 데이터 개수를 늘리기 위해서 2기 혹은 경우에 따라 3기의 위성을 사용하여 단말기로부터 송신되는 주파수를 측정한다. 도플러 천이 데이터의 개수에 따른 위치추적 정밀도를 분석하기 위해서 주파수 안정성이 20Hz이며, 단말기는 정지되어 있다고

가정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 8에서 보듯이 측정 데이터 개수가 3개인 경우 측정데이터 밀집도를 이용해서 추정 가능한 터미널의 위치는 3군데로 분포 범위가 넓다. 하지만 측정 데이터 개수가 5개인 경우는 한 지점(지역)에서 측정데이터가 가장 많이 밀집되어 있으며 이 지점이 추정 가능한 터미널의 위치가 된다. 그림 8의 경우는 위치추적 정밀도가 약 4km 정도로 비교적 정밀도가 높게 위치를 추정할 수 있다. 따라서 측정 데이터의 개수를 늘려 데이터의 밀집도를 높이는 것이 위치추적 정밀도를 높이는 한 방안을 알 수 있다.

### V. 도플러 변화율을 이용한 도플러 천이 추정

HAUSAT-2의 동물추적시스템의 경우 가용 위성 1기 이므로, 한기의 위성이 단말기를 지나가는 시간동안 최소 5개 이상의 정확한 데이터를 수신해야 한다. 하지만 위성이 평균 7분 정도에 단말기를 통과하므로 단말기의 송신주기가 1분, 즉 1분에 한번씩 송신한다면 70% 이상의 수신 성공률을 가져야 한다. 또한 단말기를 장착한 동물이 수신 불가능지역으로 들어가거나 기상환경 등의 영향으로 측정 데이터가 5개 보다 적을 경우가 많으며, 보다 정밀한 위치추적을 위해서 5개 이상의 측정 데이터가 필요할 수 있다. 따라서 ARGOS 시스템과는 달리 HAUSAT-2 ATS의 경우 1기의 위성으로 보다 정밀한 단말기 위치추적을 위해서 도플러 천이 변화율(Doppler shift rate)을 이용해서 도플러 천이를 추정하였다. 추정된 도플러 천이를 이용해서 측정 데이터의 개수를 증가시킬 수 있으며, 따라서 위치추적의 정밀도를 높일 수 있다.

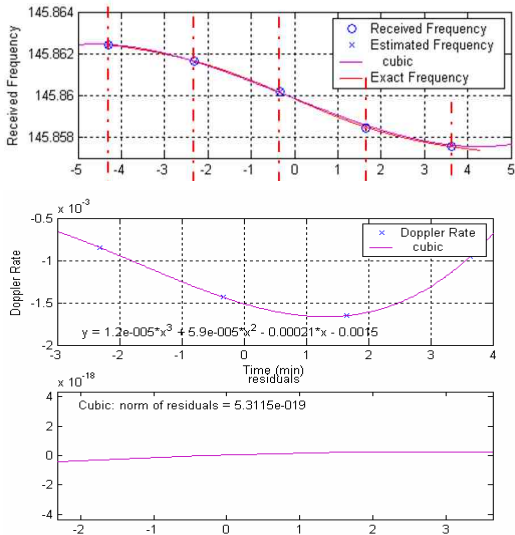
먼저 도플러 천이 변화율은 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta f = \frac{\Delta f_{t_1} - \Delta f_{t_0}}{\Delta t} \tag{4}$$

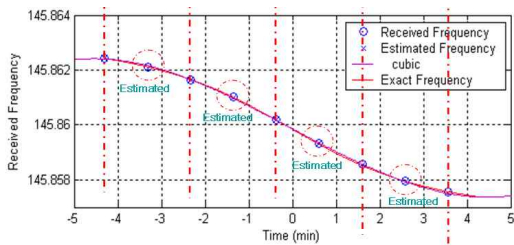
여기에서  $\Delta f_{t_1}$ 과  $\Delta f_{t_0}$ 는 각각  $t_1$ 과  $t_0$ 시간에 측정된 도플러 천이이다. 그림 9(a)는 주파수의 오차가 50Hz이며, 도플러 천이 측정치가 5개인 경우로 가정할 경우의 도플러 천이 변화율을 보여주고 있다. 이렇게 계산된 도플러 천이 변화율은 다시 최소자승법을 통해 곡선적합(Curve-fitting)을 할 수 있다. 3차 다항식을 이용 곡선적합을 수행했을 경우 매우 정밀하게 도플러 천이 변화

율을 추정할 수 있다. 이렇게 추정된 도플러 천이 변화율을 이용해서 위성의 수신기에서 받는 수신 주파수를 다음 식 (5)를 이용해서 추정할 수 있다.

$$f_r = f_t + \Delta f \cdot t \quad (5)$$

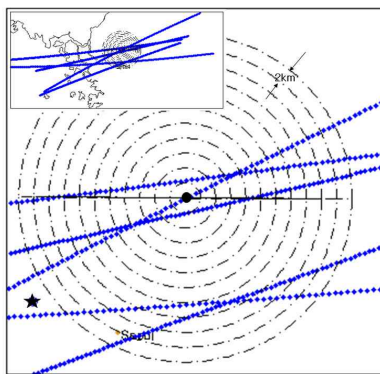


a) 도플러 천이 변화율

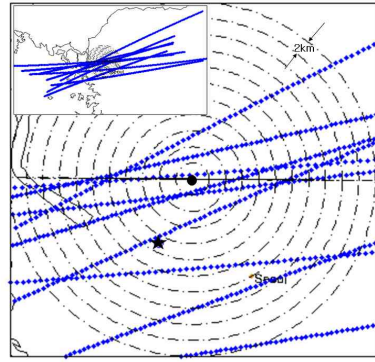


b) 도플러 천이 측정치 및 추정치

그림 9. 도플러 천이 변화율을 이용한 수신 주파수 추정



a) 5개의 측정 데이터 (위치오차 : >20km)



b) 9개의 측정 데이터 (위치오차 : <10km)

그림 10. 도플러 천이 변화율을 이용한 위치추정 정밀도(★: 실제위치, ●: 추정위치)

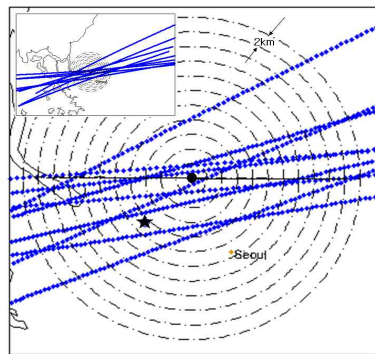


그림 11. 50Hz Random Noise 시뮬레이션1 (위치오차 : <10km) (★: 실제위치, ●: 추정위치)

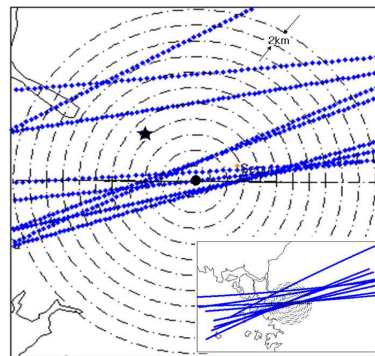


그림 12. 50Hz Random Noise 시뮬레이션2 (위치오차 : <10km) (★: 실제위치, ●: 추정위치)

그림 9(b)에서 알 수 있듯이, 5개의 측정데이터 뿐만 아니라 측정치가 없는 나머지 시간의 수신 주파수를 측정치로 이용할 수 있다. 이중 4개의



추정치를 이용해서 전체 측정데이터를 9개로 늘렸을 경우의 위치추적 결과를 그림 10에 도시하였다. 그림 10(a)에서 보듯이 5개의 측정 데이터를 이용한 경우는 위치추적 정밀도가 약 20km 이상이지만 그림 10(b)에서 알 수 있듯이 9개의 데이터를 이용한 경우 위치추적 정밀도가 약 10km 이하로 약 10km 이상 정밀도가 증가한 것을 볼 수 있다. 또한 위치추적 정밀도 향상의 경향을 보기 위해서 주파수의 오차가 50Hz Random Noise인 경우의 또 다른 시뮬레이션(시뮬레이션1, 2)을 수행하였으며 그 결과를 그림 11과 12에 나타내었다. 결과에서 보듯이 약 10km 이하의 정밀도를 유지하는 것을 알 수 있다. 따라서 HAUSAT-2과 같이 단일 위성을 사용할 경우에도 도플러 천이 변화율을 이용 측정데이터를 추정하는 방식으로 단말기 위치를 비교적 정밀하게 결정할 수 있다.

## VI. 결 론

HAUSAT-2의 동물추적시스템과 특히 도플러 천이를 이용한 단말기 위치추적에서 단일 위성을 사용하는 경우의 위치추적 방안에 대해서 기술하였으며, 시뮬레이션을 통해 위치추적 정밀도를 분석하였다. 한 기의 위성을 사용하는 경우 가장 문제가 되는 측정 데이터 개수를 확보하기 위해서 본 논문에서는 도플러 천이 변화율을 이용 수신데이터를 추정하였으며, 이렇게 추정된 데이터를 측정치로 사용하여 측정 데이터의 개수를 증가시킬 수 있었다. 결과적으로 위치추적 정밀도가 5개의 측정치를 이용할 경우에 비해서 비교적

높게 유지할 수 있으며, 본 논문에서 사용한 방식은 HAUSAT-2와 같이 단일 위성을 사용하여 동물을 추적하는 경우에 적합하게 사용될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실(National Research Lab.) 사업에 의해 수행된 결과이며 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Fancy, S.G., Pank, L.F., Douglas, D.C., "Satellite Telemetry: A New Tool for Wildlife Research and Management", Northern Prairie Wildlife Research Center, 1985.
- 2) 이정남 외, "HAUSAT-2 소형 위성 동물 추적 시스템 탑재체 개발", 한국우주과학회 학술대회 논문집, 2006, pp. 129-132.
- 3) "Guide to Data Collection and Localization Services Using Service ARGOS", DBCP Technical Document No. 3, 1995.
- 4) Ali, I., Bonanni, P.G., Al-Dhahir, N., Hershey, J.E., "Doppler Applications in LEO Satellite Communication Systems", Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002.
- 5) 유문희, 이수인, "비정지궤도 위성통신링크에서의 도플러천이 특성", 대한전자공학회 학술대회 논문집, 1998, pp. 26-29.
- 6) "Models for Propagation of NORAD Element Sets", Spacetrack Report No. 3, 1998.
- 7) <http://celestrak.com/NORAD/elements/>.