

비정지궤도 위성통신링크에서의 도플러천이 특성

유문희, 이수인

한국전자통신연구원 위성망연구실

대전광역시 유성구 가정동 161

E-Mail : moon@etri.re.kr

The Characteristics of Doppler Shift over NGSO Satellite Communication Links

Moon-Hee You, Soo-In Lee

Satellite Communication Network Section, ETRI

161, Kajeong-dong Yusong-gu, Taejeon

E-Mail : moon@etri.re.kr

요약

비정지궤도 위성통신링크에서는 지표상의 단말기, 지구국 등에 대한 상대적인 위성의 빠른 이동으로 인하여 도플러천이가 발생하며, 이는 이동위성통신 시스템 수신단의 성능을 악화시킨다. 본 논문은 비정지궤도 위성을 이용하는 통신링크 상에서 발생하는 도플러천이의 특성을 분석한다. 분석된 결과는 도플러천이에 대한 시뮬레이션 모델과 보상 알고리즘의 개발에 활용할 수 있을 것이다.

I. 서론

1960년대 이후 수 십년 동안 위성통신시스템에서는 고정위성이 폭넓게 사용되어 왔다. 그러나 고정위성에는 몇 가지의 단점이 있는데, 예를 들어 위성이 지상 36,000 km 상에 위치하므로 전파 지연과 경로 손실이 크고, 위성이 적도면 정지궤도에 있기 때문에 고위도 지역의 지구국은 위성에 대한 충분한 양각을 가질 수 없다. 이러한 저양각 및 전파 지연과 경로 손실 문제는 비정지궤도(Non-Geostationary Orbit; NGSO), 특히 700 ~ 2000 km 고도의 저궤도 위성의 사용으로 상당 부분을 해결할 수 있기 때문에 1990년대 이후 이동위성통신이나 초고속 위성통신용으로 비정지궤도 위성통신시스템이 부각되고 있다. 게다가 여러 개의 위성을 이용하여 범세계적인 시스템을 이룰 수 있는 것도 비정지궤도 위성의 장점이다.

그러나 비정지궤도 위성을 이용할 경우 물리적 특성상 지표에 대한 위성의 상대 속도가 매우 높기 때문에 발생하는 도플러 주파수 천이 현상에 의한 신호의 위상 왜곡은 지상 이동통신에 비해 그 정도가 매우 심각하다. 이동 단말기 자체의 속도는 최소 0 km/s에서 보통 사람의 도보 속도인 약 0.001 km/s, 자동차의 속도 0.016 km/s ~ 0.04 km/s 정도로 볼 수 있고, 지구의 자전에 의해 지표점이 극지역에서 0 km/s, 적도지역에서 0.46 km/s의 속도로 이동하는데, 저궤도 위성은 700 km 고도일 경우 약 7.5 km/s, 2,000 km 고도일 경우 약 7.0 km/s의 속도로 이동하므로 위성통신링크의 주파수는 상당히 큰 도플러천이의 영향을 받는다. 따라서 도플러천이의 크기에 영향을 주는 주체는 위성이고, 이동 단말기의 자체 속도는 무시할 만하다.

링크 상의 도플러 현상으로 인해 반송파 주파수가 상당히 큰 폭으로 천이되므로 이 효과는 바로 수신단의 성능을 악화시킨다. 도플러천이의 영향은 송수신단의 전송 방식에 따라 정도가 다른데, 특히 정확한 동기복조를 요구하는 디지털 통신에서 더 유해하다. 이에 따라 효과적인 시스템 전송방식을 선택하기 위해서는 발생하는 도플러 천이의 특성 및 영향을 상세히 분석해야 할 것이다.

본 논문에서는 비정지궤도 위성통신 채널의 도플러 주파수 천이 특성에 대해 분석한다. 제 2장에서는 비정지궤도 위성과 지표면과의 상대속도, 도플러 천이를 시간의 함수로 나타내어 도플러 천이에 영향을 미치는 파라미터들의 변화에 따른 최대 도플러 천이 및 최대 도플러 천이 변화량을 보인다. 또한 제 3장에서는 780 km 고도의 극궤도 위성을 사용한 통신 링크에

서 임의의 단말기를 기준으로 한 위성의 위치에 따른 제곱 양각, 도플러천이 특성에 대해 분석하고, 제 4장에서 결론을 맺는다.

II. 비정지궤도에서의 도플러천이 특성

도플러 현상에 의한 주파수 천이 $f_D(t)$ 는 다음 식과 같이 반송파 주파수에 비례하고 송/수신기의 상대속도와 전파 속도의 비율만큼 천이된다.

$$f_D(t) = f_c \cdot \frac{v(t)}{c} = -\frac{f_c}{c} \cdot \frac{d\delta(t)}{dt} \quad (1)$$

여기서 f_c 는 반송파 주파수, c 는 광속, $v(t)$ 는 단말기와 위성간의 상대속도, $\delta(t)$ 는 단말기와 위성간 거리이다.

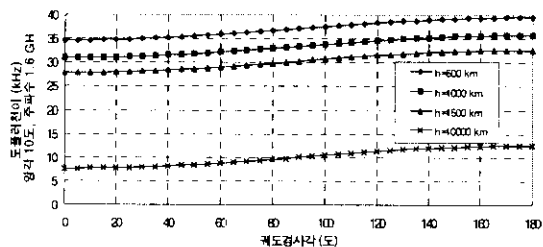
시간 $t = 0$ 일 때 위도 0° , 경도 0° 와 승교점이 일치한다고 가정하여 시간에 따라 변하는 위성의 궤도각을 $\Omega_s(t) = \omega_s \cdot t$ 라 하고 단말기의 승교점 기준 경도각을 $\Omega_e(t) = \Omega_0 + \omega_e \cdot t$ 라고 하였을 때, 규칙적으로 움직이는 지구와 위성간의 이동을 기준으로 하여 비정지 원궤도 위성의 이동에 의한 단말기와 위성간 거리, 도플러천이는 다음 식 (2), (3)과 같이 유도된다. 여기서 각 파라미터의 의미는 다음과 같다.

- ω_s : 위성의 각속도
- ω_e : 지구의 각속도
- r_s : 위성 궤도반경
- r_e : 지구반경
- h : 궤도높이
- i : 궤도경사각
- θ : 단말기 위치의 위도
- f_c : 반송파 주파수

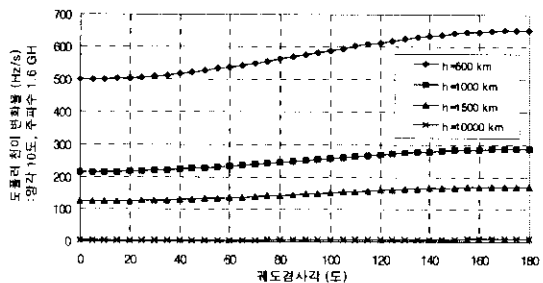
식 (3)에서 알 수 있듯이, 도플러천이는 시스템의 반송파 주파수에 정비례하고, 위성군의 고도, 궤도 기울기, 단말기의 위도 위치에 영향을 받는다. 또한 도플러천이 합수를 시간 변수로 미분한 도플러 천이의 변화율도 동일한 파라미터에 의해 영향을 받는다.

그리고 동일 고도일지라도 궤도 경사각이 다름에 따라 위성과 단말기간의 상대 속도가 달라진다. (그림 1)과 (그림 2)는 고도 500, 1000, 1500, 10000 km에 있는 위성의 궤도 경사각이 다른 경우의 도플러천이와 도플러천이의 시간 변화율을 나타내었다.

(그림 1)과 (그림 2)에서 궤도 경사각이 클수록 도



(그림 1) 위성 고도별 궤도 경사각에 따른 도플러천이



(그림 2) 위성 고도별 궤도 경사각에 따른 도플러천이 변화율

플러천이와 도플러천이 변화율이 커짐을 알 수 있다. (그림 2)의 변화율은 절대값으로 나타내었다.

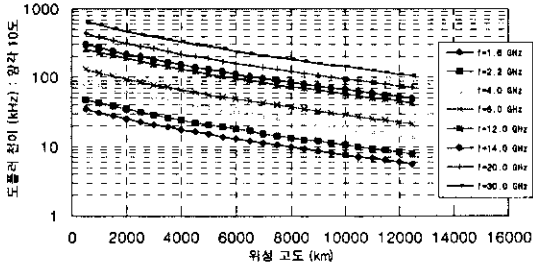
(그림 3)과 (그림 4)는 위성 고도와 반송파 주파수에 따른 도플러천이와 그 변화율을 나타내었다. 식 (3)에서 예측할 수 있듯이 위성 고도가 낮아짐에 따라, 반송파 주파수가 증가함에 따라 도플러천이와 그 변화율이 증가한다. (그림 4)의 변화율은 절대값으로 나타내었다.

(그림 5)는 90도의 경사각을 가진 위성이 500, 1000, 1500, 10000 km의 높이로 주회할 때, 경도 0도, 위도 0도 또는 70도에 있는 단말기와 통신 링크에서 발생하는 도플러천이를 나타내었다.

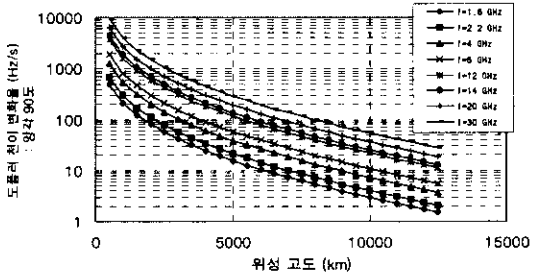
(그림 5)에서 보듯이 단말기의 위도 위치의 변화는 도플러천이와 도플러천이 변화율에 큰 영향을 미치지 않는다. 이러한 결과는 위도에 따라 지구의 자전 속도가 다르기 때문에 단말기 위치의 위도가 도플러천이에 영향을 주지만, 위도와 무관한 위성의 속도가 지구의 자전 속도보다 상대적으로 크기 때문에 위도 변화의 영향은 무시될 수 있음을 보여준다.

$$\delta(t) = \sqrt{r_s^2 + r_e^2 - 2r_s r_e [\cos \theta \cos \Omega_s(t) \cos \Omega_e(t) + \cos i \cos \theta \sin \Omega_s(t) \sin \Omega_e(t) + \sin i \sin \theta \sin \Omega_s(t)]} \quad (2)$$

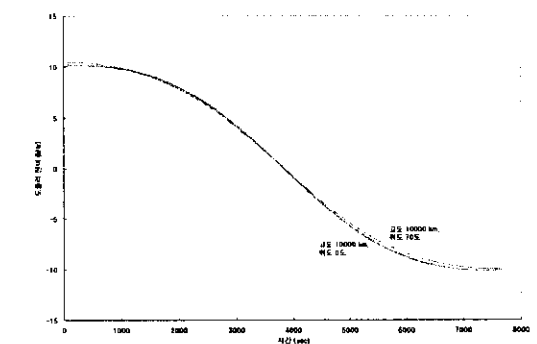
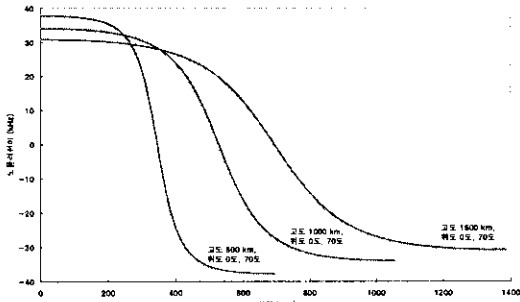
$$f_D(t) = \frac{f_c}{c} \cdot \frac{r_s r_e}{\delta(t)} [(\omega_e \cos i - \omega_s) \cos \theta \sin \Omega_s(t) \cos \Omega_e(t) + (\omega_s \cos i - \omega_e) \cos \theta \cos \Omega_s(t) \sin \Omega_e(t) + \omega_s \sin i \sin \theta \cos \Omega_s(t)] \quad (3)$$



(그림 3) 주파수별 위성 고도에 따른 도플러천이



(그림 4) 주파수별 위성 고도에 따른 도플러천이 변화



(그림 5) 단말기 위도가 0도, 70도일 경우 시간에 따른 도플러천이 변화

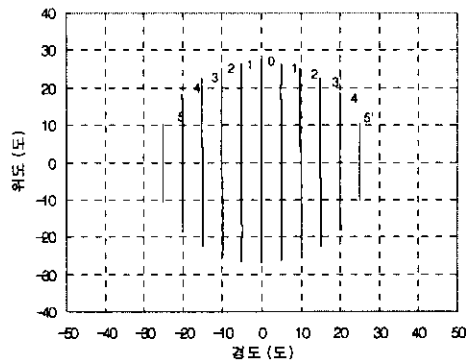
III. 비정지궤도 위성궤적에 대한 도플러천이 특성

본 절에서는 극궤도 위성통신 링크에 대한 도플러천이 특성을 분석하도록 한다.

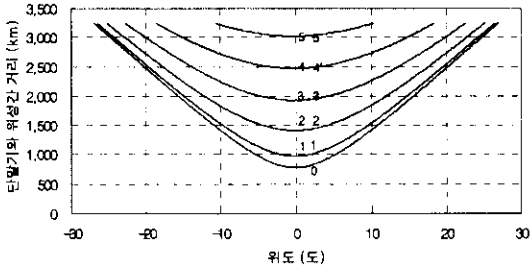
(그림 6)은 위도 0도, 경도 0도에 단말기가 있을 때 고도 780 km 상에 궤도 기울기 86.4도로 운용되는 극궤도 위성의 가시 궤적을 경도 5도 간격으로 도시하였다. 이 그림에서 위성의 이동방향은 남쪽에서 북쪽으로 상승궤적이다. 위성의 궤도 기울기가 90도에 가까운 극궤도이므로 위성 궤적이 경도 0도를 축으로 양편이 대칭됨을 알 수 있다.

이에 따라 경도 0도에서 경도 -25도간에 있는 위성의 궤적을 따라 위도의 변화에 대한 단말기와 위성간의 거리와 단말기에 제공되는 위성의 양각이 (그림 7)과 (그림 8)에 나타내었다. (그림 7)과 (그림 8)로부터, 단말기 위를 위성이 바로 지나가는 궤적인 경도 0도 부근의 궤적이 거리와 양각 그래프에서 모두 가장 변화의 폭이 크고, 경도 25도의 궤적은 단말기에 대해 가시되는 궤적길이가 짧듯이 단말기와의 거리와 양각의 변화의 폭이 좁음을 알 수 있다.

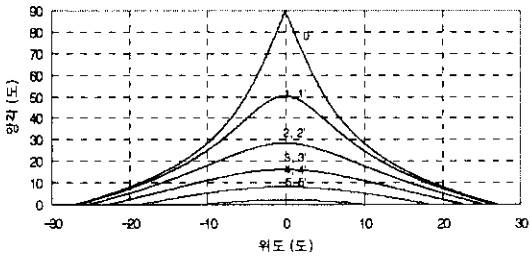
각 궤적에 대한 도플러천이와 도플러천이의 변화율이 (그림 9)와 (그림 10)에 나타나 있다. (그림 9), (그림 10)을 (그림 7), (그림 8)과 비교해 보면, 단말기와 위성간의 거리나 양각이 동일할지라도 도플러천이나 도플러천이의 변화율이 다를 수 있다 즉, 동일 궤적의 동일 거리 또는 동일 양각에 대해서 위성의 진행방향이 단말기를 향하여 다가오는가, 아니면 멀어지는가에 따라 도플러천이는 양(positive)의 값을 갖거나, 음(negative)의 값을 갖고, 도플러천이의 변화율은 동일 궤적의 동일 양각에 대해 같은 값을 갖지만, 단말기 위치에서 보는 위성 궤적이 같지 않을 경우에는 위성 거리나 양각이 같을 지라도 도플러천이와 도플러천이 변화율이 다르다.



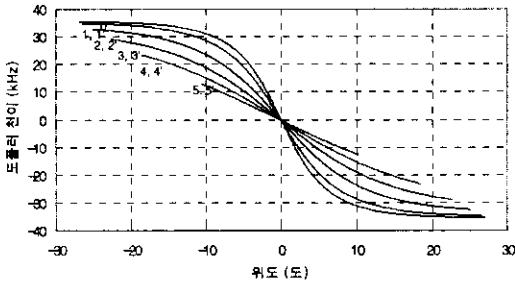
(그림 6) 위도=0도,경도=0도 상에서 본 극궤도 위성의 가시궤적



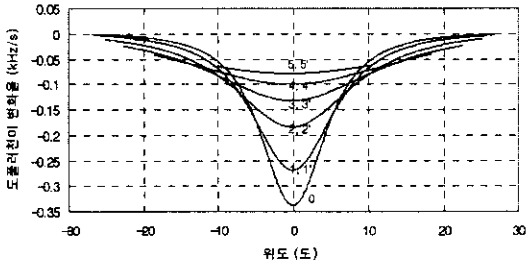
(그림 7) 각 궤적별 위도에 따른 단말기와 위성간의 거리



(그림 8) 각 궤적별 위도에 따른 위성의 양각



(그림 9) 각 궤적별 위도에 따른 도플러천이



(그림 10) 각 궤적별 위도에 따른 도플러천이의 시간 변화율

단말기에 대해 가시되는 한 위성의 궤적에서 단말기와 위성간의 거리가 제일 가까운 지점, 즉 양각이 제일 큰 지점에서 도플러천이는 항상 0 kHz이고, 도플

러천이의 시간 변화율은 그 절대값이 그 궤적내에서 최대가 된다. 최대 도플러천이는 위성이 단말기의 바로 위를 지나가는 지점, 즉 양각이 90도를 이루는 순간이 있는 궤적에서 최저 양각일 때 발생하고, 그 순간 도플러천이의 변화율은 0이다.

IV. 결론

비정지궤도 위성을 사용하는 통신링크에서는 지구의 자전에 비해 위성의 공전 속도가 매우 빠르기 때문에 단말기와 위성간의 상대 속도가 수시로 변하여 반송파 주파수가 수십 ~ 수백 kHz의 폭으로 천이되어 온다. 이로 인하여 수신단에는 신호의 위상이 심하게 왜곡되어 결국 수신단의 성능이 크게 저하된다. 따라서 비정지궤도 위성통신 링크상에서 발생하는 도플러천이에 의한 성능 저하를 최소한으로 하는 보상 기술을 개발하기 위해서는 도플러천이의 특성을 면밀히 분석하는 작업이 선행되어야 한다.

본 논문에서는 비정지궤도 위성통신링크상에서 발생하는 도플러천이에 대한 특성을 위성의 고도, 궤도의 기울기, 반송파 주파수, 단말기의 위치와 위성의 궤적에 따라 분석하였다.

임의의 비정지궤도 위성통신 시스템에서 위성의 궤적이 단말기의 정위치를 지나갈 경우 최저 양각에서 최대의 도플러천이가 발생하고, 90도의 양각에서 도플러천이의 변화율이 최대가 되는데, 위성의 고도가 낮을수록, 궤도 경사각이 클수록, 반송파 주파수가 높을수록 최대 도플러천이와 최대 도플러천이 변화율이 크다. 그러나 단말기의 위도의 변화에 따라서는 도플러천이에 주는 영향은 거의 무시할 만하다. 또한 양각이 동일하다고 도플러천이나 도플러천이의 변화율이 같지는 않다.

이와 같이 분석된 도플러천이의 특성은 도플러천이 시뮬레이션 모델과 도플러천이 보상 알고리즘 개발에 활용될 수 있을 것이고 또한 비정지궤도 위성통신 시스템 설계시 전송방식 설정에 중요 파라미터로 활용되리라 사료된다.

<참고문헌>

- [1] ITU, "Recommendation ITU-R M.1225", App. 2 to Annex 2.
- [2] Michael J. Miller et al, "Satellite Communications : Mobile and Fixed Services", Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [3] G. Maral, "Personal Satellite Communication Systems", CEI-EUROPE, 1994.