

위성간링크를 이용한 극저궤도 이동위성통신시스템의 성능분석

정희원 김 덕 년*, 준회원 김 영 준*

Performance Analysis of Polar Low Earth Orbit Mobile Satellite Communication Systems Using Inter-Satellite Link

Young Jun Kim*, Doug Nyun Kim* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 극궤도를 주회하는 저궤도 이동위성시스템의 통신성능과 특성을 기하학적 모델링과 분석을 통하여 일반화된 성능과라메타로 표시하였다. 특히 음성서비스를 주 목적으로 하는 저궤도 이동위성시스템의 위성궤도 수(M)와 궤도당 주회위성수(N)에 따른 성능분석 관계식을 유도하였고 최근 상용화 준비중인 이리듐 시스템(M=6, N=11)에 적용하여 분석하였다. 성능분석의 결과로서 극궤도 위성시스템의 위성간 링크(Inter-Satellite Link; ISL)에 걸리는 Offered traffic, ISL링크의 블로킹확률, 새로 발생한 call의 블로킹확률과 이미 서비스중인 call의 강제종결 확률을 구하였다.

ABSTRACT

In this paper, the communication performance and its characteristics of the polar Low Earth Orbit(LEO) mobile satellite have been described in terms of the generalized performance parameters via geometric modeling and analysis. Especially, the general formula related to the parameters such as the number of orbits(M) and the number of satellites per orbit(N) were derived in the LEO satellite system for voice service, and then we applied the general result to IRIDIUM system(M=6, N=11) that would be scheduled to commercialize soon. The offered traffic of Inter Satellite Link(ISL), ISL link blocking probability as well as both new call blocking probability and the probability of forced termination for the on going call are duly calculated as a result of performance analysis.

I. 서 론

정보의 폭증과 더불어 인간의 활동범위가 넓어지고 다양해지면서 시간과 장소에 관계없이 다수의 통신서비스를 제공받으려는 욕구가 증가하고 있다. 지상의 이동통신망은 서비스지역의 가입자 이동속도에 따라 핸드오프의 빈도수가 변하며 계층화된 중첩셀 구조(Overlayered Cell Structure)를 제공하므로써 다이나믹한 채널 할당방식을 이용하여 통신용량의 극대화 및 유연한 통신서비스가 가능해지고 있다^{[1],[2]} 지상

이동셀룰라망은 위성통신기술의 광역성을 활용하여 전 지구 네트워크 구축이 가능해짐에 따라 이동/위성통신 통합망 구조에 관한 연구가 여러형태로 진행되어왔다. 정지궤도위성과의 통합망을 구성할 경우 매우 광활한 지역을 커버할 수 있는 이점 때문에 단일위성으로도 지상 이동가입자에게 직선연결서비스를 제공할 수 있으나, 소비전력과 안테나기술의 미비로 현재까지는 고정지구국을 경유한 통신 서비스가 상용화 되어있는 상태이며^[3], 경제성문제로 위성전송로는 보조경로(Alternate Path)로서 사용되고 있다. 진

* 명지대학교 전자정보공학과(kyiplus@wh.myongji.ac.kr)
논문번호 : 98263-0623, 접수일자 : 1998년 6월 23일

정한 의미로서의 전지구통신망(Global Communication Network)을 이동가입자에게 저렴한 통신비용으로 제공하려면 저궤도위성(LEO Satellite)을 이용하여 정지궤도(GEO)위성의 출력문제를 완화시키므로써 이동단말기의 비용감소와 고속서비스의 구현이 가능하도록 해야한다. LEO 위성시스템은 GEO 위성시스템보다 빔전력강도 마진이 향상되기 때문에 통신용량 증대의 이점이 있으며, 고속으로 주회하는 궤도특성 때문에 지상 셀룰라 시스템은 핸드오버가 가입자의 이동성에 기인하는데 반하여 LEO 위성 이동시스템은 위성의 모빌리티에 의한 강제 핸드오버의 특징이 있다. LEO 위성 중에서 Teledesic^[4]과 같이 지상고정셀(Earth Fixed Cell)을 서비스지역에 고정분할하여 위성이 궤도 상공을 주회하는 동안 빔 스티어링을 통하여 어느 순간에 이웃하는 고정셀로 완전 스위칭하는 방식이 있다. 이방식은 위성의 이동에 따르는 빔 핸드오버가 자연스럽게 인접한 위성으로 넘어가기 때문에 지상 mobile의 강제핸드오버 발생이 없다. 그러나 빔스티어링 사용을 위해서는 정교한 기술이 요구된다. 저궤도 위성의 다른방식으로는 IRIDIUM^[5]과 같이 위성고정셀(Satellite Fixed Cell)을 도입하는 방식이 있으며 이는 위성에서 조사하는 일정크기의 빔이 위성의 이동에 따라 함께 빠른 속도로 이동하므로써 강제핸드오버가 빈번히 발생한다. IRIDIUM과 같은 LEO 위성시스템은 지상 약 780km 상공에서 극궤도를 주회하는데 순항속도가 시속 약 26,600km로서 지구자전속도(시속 약 1,670km)보다 훨씬 빠르며 핸드오버는 일정한 방향과 속도를 가진다고 볼 수 있다. 이에 착안하여 Enrico Del Re는 그의 발표논문^{[6][8]}을 통하여 강제핸드오버 환경하에서 강제종결확률을 LEO위성의 이동속도의 함수인 핸드오버 콜의 최대대기시간으로부터 유도하였다. 이러한 제안은 블록킹되는 요인이 전적으로 위성의 주회운동에 의한 지상이동단말기의 빔핸드오버에서 비롯된 것으로 가정한 모델을 기초로 하고 있다. 그러나 실제로 On-going콜의 블록킹 요인은 통신경로가 설정되어있는 두 지점간에 모든 링크에서 토폴로지변화에 의해 발생하는 링크 블록킹이 적어도 한 링크에서 일어나고 우회경로가 모두 폐쇄될 경우에 항상 존재한다. 그림1에서와 같이 두 개의 이동단말국 A와 B간의 링크는 지상과 위성간의 설정된 상하향링크(Up/Down Link)와 인근 위성간에 설정된 ISL링크로 구성되며 위성의 주회운동은 상하향링크 뿐만 아니라 ISL링크의 설정과 블록킹에 모두 영향을 미친다. 본 논문은 이러한 LEO 이동위성의 특수성과 지상부분과 위성

부분의 종합적인 통신환경을 고려하여 ISL링크에 대한 새로운 모델을 제안하고 성능평가를 하고자 한다.

II장에서는 극궤도(LEO)위성의 기하학적 특징을 분석하고 III장에서는 고려되는 통신 모델과 기본가정을 기술한다. IV장에서는 수학적 분석과 더불어 주요 성능파라미터를 유도하고 극궤도를 주회하는 LEO위성의 특성을 분석한다.

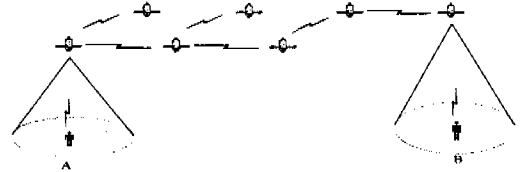


그림 1. LEO위성의 링크연결 예

II. 극궤도위성의 기하학적 특성



그림 2. 극궤도 LEO 위성시스템의 배치도

분석하고자하는 극궤도 위성시스템은 그림 2처럼 M개의 극궤도가 존재하고 각 극궤도 평면들은 서로 이웃하는 궤도평면끼리 $\frac{180}{M}$ 의 각도를 이루고 각각의 극궤도에는 N개의 위성들이 등간격을 유지하고 소속궤도를 주회한다. 극궤도위성은 일정주기를 가지고 극궤도를 선회하므로 언젠가는 모든 위성이 상호 동일한 위치좌표와 시스템 토폴로지를 갖는 상태로 돌아오고 다시 동일한 기하학적 분포 상태를 반복한다. 모든 위성은 남북방향으로 상승하다가 북극을 지나면 다시 북남방향으로 하강하며 극점에서 서로 교차한다. 동일방향으로 이동하는 위성군에서 위성간 링크는 서로 이웃하는 위성파만 ISL링크가 형성되며 위성간 상대거리와 위치에 관계없이 항상 고정되어 있다. 이웃위성은 동일궤도상에서 함께 주회하는 선도위성(Leading Satellite)과 추종위성(Trailing Satellite)이 포함되고 동일방향으로 이동하는 이웃하는 궤도

의 위성이 좌우 한 개씩 있다.

각 위성은 주회시 지상의 이동 또는 고정가입자와 통신하기 위해 일정크기의 단일 위성 고정빔(Single Satellite Fixed Beam)을 조사하며 빔과 빔간은 적절히 Overlap되어 오버랩 지역에서 빔 핸드오버가 발생한다. 이때 육상이동체의 속도는 빔 이동속도에 비해 매우 작으므로 무시할 수 있으며 핸드오버는 일정한 방향으로 진행된다. 그림 2에서 남북방향으로 선회하는 위성궤도중 좌우 양쪽 끝에 위치한 궤도는 북남 방향으로 선회하는 궤도와 인접하게 되고 두 궤도에 위치한 위성들은 서로 반대방향으로 이동하며 상호 통신링크가 없다고 가정한다. 그러므로 양끝궤도의 위성이 지구반대편 지역과 ISL링크를 형성하려면 먼저 자신의 궤도내 다른 위성을 경유하여 최단경로로 연결하게 된다. 그림 3은 그림 2을 펼쳐서 재구성한 것으로 위성궤도들이 극지점상공에서 상호위치 배열을 발전하여 진행되는 기하학적 모형을 보여준다.

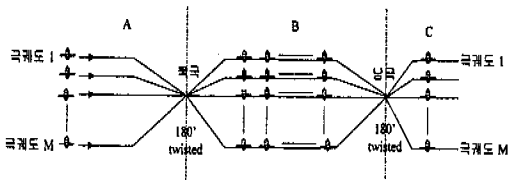


그림 3. 극궤도LEO위성의 전개도

지역 A와 C에서는 위성들이 남→북방향으로, 지역 B에서는 북→남방향으로 이동한다. 극 지점에서 180° 뒤틀림 현상이 발생하나 링크연결이 가능한 이웃하는 위성은 변하지 않는다. 이러한 관찰에 주목하면 그림 3에 근거하여 우리는 위성의 배치를 수학적 분석을 위해 평면적으로 재배치하여 기준 위성군을 중심으로 그림 4에 나타내었다.

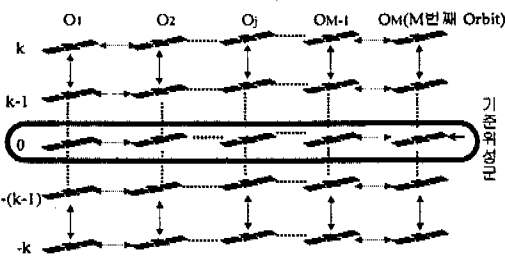


그림 4. 극궤도 위성배열의 평면배치도

기준위성군이란 같은 방향으로 움직이는 동서방향

의 serial 링크로 연결된 M개 이웃위성들로 구성된 집합이다. 각 궤도는 $N=2k+1$ 개의 위성들로 되어 있으며 기준위성을 중심으로 항상 상방향으로 k개, 하방향으로 k개의 위성들로 구성되고 다음과 같은 관측이 가능하다.

- 각 위성의 주회속도는 일정하며 극지점에서의 뒤틀림현상은 위상학적으로 상호 위성링크에 영향을 주지 않는다.
- 위성 S_a 와 위성 S_b 간의 ISL링크는 두위성을 연결하는 이웃위성노드간의 최 단 경로로 설정되고 ISL링크 연결 가지수는 최단경로 경우의 수 (Minimum Number of Hops)이며 다음과 같이 표시된다.

$$N_L(S_a, S_b) = \frac{(i+j)!}{i!j!} \quad (1)$$

여기에서 위성 S_a 와 위성 S_b 는 수평축으로 i번 수직축으로 j번의 경로를 거쳐 연결된다.

- 위성 S_a 가 소속된 위성군을 기준위성군으로 정하면 목적위성 S_b 까지의 경로는 최소 경로수 $N_L(S_a, S_b)$ 중의 하나를 선택한다.
- 기준위성군은 그림 4에 나타난 바와 같이 항상 위성배열의 중심에 위치하게 할 수 있다. 목적지위성(Destination Satellite; D위성)이 어디에 위치하든 지 기준위성(Originating Satellite; O위성)으로부터 상대적위치 관계에만 영향을 받는다. 즉 k열과 (-k)열에 속한 위성들은 시작위성으로부터 가장 멀리 떨어져있는 위성들이다.

III. LEO 위성통신 모델

II장에서 고찰한 LEO 위성 시스템의 기하학적특성을 구간으로 하여 통신 트래픽을 정량적으로 분석하기 위하여 다음과 같은 기본가정을 전제로 한다.

- 1) LEO위성은 전 지구상에 고르게 분포하여 M개의 극궤도를 따라 주회한다.
- 2) 각 위성은 이웃하는 위성과 동서방향과 남북방향으로만 통신이 가능하며 각 링크마다 L_k 개 양방향회선을 사용할 수 있다. 우선순위가 높은 서비스를 위한 예비회선은 고려하지 않는다. 각 링크회선이 모두 사용시에는 새로운 콜은 블록킹된다.

- 3) 각 위성은 기타 다른 위성의 링크상태정보를 서로 공유한다. 이러한 가정은 LEO 위성수가 커질수록 신호제어측면에서 별도로 연구되어야 하나, 일 반적으로 구현 가능하다. 한 방법으로 각 궤도마다 제어 위성을 하나씩 두고 소속궤도 위성의 상태 정보를 수집, 교환, 분배를 주기적으로 실시한다.
- 4) 각 위성의 입력트래픽은 포아송분포를 따르며 위성의 이동위치에 관계없이 제공되는 트래픽 밀도는 모든 위성마다 같다고 가정한다.
- 5) 호 연결요청을 위한 O-D 위성쌍은 균등(Uniform)하게 분포한다.
- 6) 각 위성과 지상 이동가입자간에 설정된 상하향 링크(Up/Down link)용량은 L_s 이다.
- 7) 위성의 이동에 의해 ISL링크 토폴로지는 변하지 않으나, 링크 Connectivity는 변할 수 있다. 그러므로 일단 ISL링크로 연결되어 서비스중인 콜이라 하더라도 강제종료 될 수 있으며 상하향링크에서 발생하는 강제종료와 별도로 고려되어야 한다.
- 8) 위성의 이동으로 형성된 빔셀(Satellite Fixed Cell)의 이동으로 빈번한 핸드오버가 불가피하며 이는 결과적으로 새로이 발생한 콜의 블록킹확률을 증가시킨다. 본 논문은 ISL 링크특성과 이동 위성에 의한 영향을 종합적으로 고려한다.

IV. 수학적 모델

4-1 ISL 링크 분석

II장에 설명한 ISL링크는 이웃 위성간에만 형성된다. 각 링크에는 L_s 개의 양방향채널이 있으며 위성궤도수 M 과 궤도당 주회위성수 N 을 가지는 총링크수 N_L 은

$$N_L = (2M - 1) \times N. \quad (2)$$

각 링크에 걸리는 실제 트래픽(Carried Traffic; λ_L)은 위성노드에 원천적으로 발생하는 트래픽(Offered Traffic; λ)과 위성망 토폴로지에 의해 결정된다. 각 위성에 걸리는 트래픽은 일정하고 λ_L 은 그림 4를 참고하여 계산된다.

동일궤도에 속한 위성들은 언제나 같은 토폴로지를 가지므로 k 번째 궤도에 속한 위성이 영향을 주는 ISL위성망의 트래픽 $\lambda_L(k)$ 는 기준위성군을 종축으로

하여 배치할 때 다음과 같다.

$$\lambda_L(k) = 2 \left[\sum_{i=0}^{M-k} \sum_{j=0}^{(N-1)/2} (i+j) \times \lambda_{i,j} + \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^{(N-1)/2} (i+j) \times \lambda_{i,j} - \sum_{j=0}^{(N-1)/2} j \times \lambda_{0,j} \right] - \left(\sum_{i=0}^{M-k} i \times \lambda_{i,0} + \sum_{i=0}^{k-1} i \times \lambda_{i,0} \right) \quad (3)$$

$k=1, 2, \dots, M.$

여기에서 $\lambda_{i,j}$ 는 기준위성으로부터 수평축으로 i 번 수직축으로 j 번의 경로를 거친 지점의 목적지 위성까지의 트래픽이며 모든 위성쌍에 대하여 동일하다고 가정한다.

$$\lambda_{ij} = \frac{\lambda}{N_s}, \quad 0 \leq i \leq M, \quad 0 \leq j \leq N \quad (4)$$

여기에서 N_s = 총 LEO 위성수 = $M \times N$.

k 번째 궤도에 속하는 위성의 트래픽 기여도는 같으므로 총트래픽 발생량 λ_L 은

$$\lambda_L = N \sum_{k=1}^M \lambda_L(k) \text{가 된다.} \quad (5)$$

단위 링크당 걸리는 실제 트래픽 λ_L 은 (2)식을 이용하여 구한다.

$$\lambda_L = \frac{\lambda_L}{N_L} \quad (6)$$

ISL링크상에서 콜 블록킹 확률은 새로운 콜이 발생했을 때 O위성에서 D위성까지 연결할 경로가 존재하지 않아 경로 설정이 거부될 확률이다. 인접위성간 링크블록킹 확률을 P_B 라 하고 $P_{i,j}$ 를 S위성으로부터 수평축으로 i , 수직축으로 j 번의 경로를 거친 지점의 D 위성까지 블록킹되지 않고 연결경로가 존재할 확률이라 하자.

D위성으로 연결경로를 최단거리만 이용한다면 $\frac{(i+j)!}{i!j!}$ 개의 경로가 존재한다. 따라서 모든 최단거리 경로가 블록킹되면 콜은 연결 경로 설정을 못한 다.

$P_{i,j}$ 와 P_B 의 관계식은 다음과 같다.

$$P_{i,j} = (1 - P_B)P_{i,j-1} + (1 - (1 - P_B)P_{i,j-1}) (1 - P_B)P_{i-1,j}, \quad i \geq 1, \quad j \geq 1. \quad (7)$$

그리고 경계치 조건으로

$$P_{i,0} = P_{0,i} = (1 - P_B)^i, \quad P_{i,i} = P_{i,i} \quad (8)$$

따라서 상대거리 (i,j)인 O위성에서 D위성까지의 콜 블록확률 $P_B(i,j)$ 는

$$P_B(i,j) = 1 - P_{i,j} \quad (9)$$

여기서 P_B 는 링크 블록확률이므로 다음과 같은 M/M/N/N 큐잉모델로 부터 구할 수 있다.

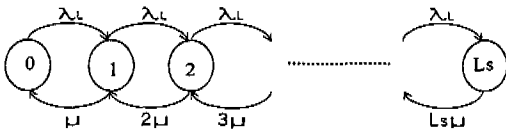


그림 5. 위성간 링크의 M/M/N/N 큐잉모델

$$P_B = \text{Prob. [링크 state } X = Ls]$$

$$= \frac{\frac{1}{Ls!} \rho_L^{Ls}}{\sum_{j=0}^{Ls} \frac{\rho_L^j}{j!}} \quad (10)$$

여기에서 $\rho_L = \lambda_L / \mu$. (11)

그림 4에서 보느냐와 같이 한 궤도를 주회하는 위성들은 모두 같은 기하학적 특성을 가지며 모든 위성으로부터 처리할 트래픽 밀도가 위성의 위치에 무관하게 일정하다면 좌측으로부터 k번째 궤도를 주회하는 위성의 평균 블록킹 확률 $P_{BL}(k)$ 는 다음과 같다.

$$P_{BL}(k) = \frac{2 \left[\sum_{i=0}^{N_s-k} \sum_{j=0}^{(N_s-i)/2} P_B(i,j) + \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^{(N_s-i)/2} P_B(i,j) - \sum_{i=0}^{(N_s-1)/2} P_B(0,i) \right]}{\left(\sum_{i=0}^{N_s-k} P_B(i,0) + \sum_{i=0}^{k-1} P_B(i,0) \right)} \quad k=1,2,\dots,M \quad (12)$$

그리고

$$P_{BL}(k) = P_{BL}(M+1-k) \quad P_B(0,0)=0 \quad (13)$$

그리고 ISL링크 평균 블록킹 확률 P_{BL} 는 아래와 같이 주어진다.

$$P_{BL} = \frac{\sum_{k=1}^M P_{BL}(k)}{M} \quad (14)$$

4-2 위성 상하향 링크분석

LEO 이동위성의 특성과 성능분석

저궤도 이동위성은 고도가 낮아짐에 따라서 주행 속도가 빨라지고 핸드오버도 더 빨리 일어난다. 따라서 위성 스팟빔이 고정되어 있을 경우와 비교해서 강제핸드오버 요소를 고려해야 한다. 위성의 주행속도를 V_s , 스팟빔 반경을 R이라하고 통화지속시간이 파라미터 T_m 의 지수분포특성을 가지면 새로운 콜이 핸드오버될 확률 P_{h_1} 과 핸드오버된 콜이 다시 핸드오버가 일어날 확률 P_{h_2} 는 다음과 같이 표시된다⁷⁾.

$$P_{h_1} = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha}) \quad (15)$$

$$P_{h_2} = e^{-\alpha} \quad (16)$$

여기에서 α 는 가입자의 이동특성을 나타내는 파라미터로서 $\alpha = \frac{2R}{V_s T_m}$ 로 표시되며 저궤도 위성속도와 스팟빔 크기가 주어지면 항상 구할 수 있다. 이미 설정된 콜이 핸드오버하는 현상을 정량적으로 분석하기위해 정상상태에서 한 스팟빔 셀의 핸드오버 도착률(Arrival Rate)과 핸드오버 이탈률(Departure Rate)이 같아 진다고 가정한다. P_{h_1} 을 새로운 콜의 접속 실패 확률, P_{h_2} 를 어떤 콜의 핸드오버 실패확률이라 하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\lambda_n (1 - P_{h_1}) P_{h_1} (1 - P_{h_2}) + \lambda_n P_{h_1} (1 - P_{h_2}) = \lambda_n \quad (17)$$

위 등식에서 좌변항은 핸드오버 도착률을 나타내며 이는 새로운 콜이 접속에 성공하고 핸드오버 시점까지 콜이 지속한 후 성공적으로 핸드오버하는 트래픽과 기존의 핸드오버된 콜이 다시 핸드오버 시점까지 지속한 후 성공적으로 핸드오버하는 트래픽의 합으로서, 관찰하는 셀의 핸드오버 도착률이다. 그리고 우변항은 핸드오버 이탈률을 나타낸다. 식(17)을 정리하면

$$\frac{\lambda_n}{\lambda_n} = \frac{(1 - P_{h_1})(1 - P_{h_2}) P_{h_1}}{1 - (1 - P_{h_2}) P_{h_2}} \triangleq r_h \quad (18)$$

강제핸드오버가 발생하는 시점은 두 스팟빔이 서로 겹치는 부분에서 발생하며 적당한 채널 배정이 없으면 핸드오버는 실패한다. 원형빔의 경우 겹치는 지역의 두께는 일정하지 않으므로 설계방식에 따라 다르나 스팟빔 반경의 0.2배로 가정하고 핸드오버 실패율(failure rate) μ_f 를

$$\mu_f = (\text{평균핸드오버 처리시간})^{-1} = \frac{V_s}{0.2R} \text{라 하면}$$

그림 6과 같은 큐잉모델을 설정할 수 있다.

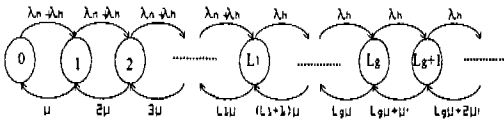


그림 6. 상하항링크의 큐잉모델

그림 6에서와 같이 시스템의 실제 채널수용용량은 L_g 이므로, L_g 이후의 시스템 상태는 핸드오버시점에 서 요청되는 콜 수에 따르는 사망률(death rate)을 고려한 것이다. 따라서 $(L_g + j)$ 의 시스템 상태는 $j\mu_j$ 사망률을 더해야 한다. 새로운 콜은 시스템 상태가 L_1 이상일 경우에는 억세스가 차단되고 그 이후는 핸드오버 콜만 받아들인다. 그림 6에 근거해서 시스템 상태 확률 $\{P_j, j=1, 2, \dots\}$ 의 관계식은 다음과 같다.

$$P_j = \begin{cases} \frac{(1+r_h)^j \rho^j P_0}{\lambda_n^{j-1} \cdot (1+r_h)^{L_1} \cdot \rho^j} P_0 & 1 \leq j \leq L_1 \\ \frac{(1+r_h)^{L_1} \cdot \lambda_n^{L_1} \cdot \lambda_n^{j-L_1}}{L_1! \cdot \mu^L \cdot \prod_{i=0}^{L-1} (L_g \mu + i \mu)} P_0 & L_1 + 1 \leq j \leq L_g \\ \frac{(1+r_h)^{L_1} \cdot \lambda_n^{L_1} \cdot \lambda_n^{j-L_1}}{L_1! \cdot \mu^L \cdot \prod_{i=0}^{L-1} (L_g \mu + i \mu)} P_0 & L_g + 1 \leq j \leq \infty \end{cases} \quad (19)$$

그리고

$$\sum_{j=0}^{\infty} P_j = 1, \quad \rho = \frac{\lambda_n}{\mu} \quad (20)$$

위 식의 $\{P_j, j=1, 2, \dots\}$ 해를 찾으면, 새로운 콜이 블록킹될 확률 P_{b_1} 은

$$P_{b_1} = \sum_{j=L_1}^{\infty} P_j \quad (21)$$

그리고 핸드오버가 실패할 확률 즉 핸드오버 콜이 블록킹될 확률 P_{b_2} 는^[9]

$$P_{b_2} = \sum_{n=L_g}^{\infty} P_{b_{21}} P_n \quad (22)$$

여기에서

$$P_{b_{21}} = 1 - \prod_{j=0}^{n-L_g} \left(1 - \frac{\mu_f}{(L_g \mu + \mu) 2^j}\right) \quad (23)$$

그러나 λ_n 와 λ_h 의 비인 r_h 는 그자체가 P_{b_1}, P_{b_2} 의 함수로 표시되어있어 초기치를 잡고 반복순환방식(recursive method)을 이용하여 수렴하여 푼다. 그림 6에서 서비스 시상수 $\frac{1}{\mu}$ 은 새로운 콜과 핸드오버 콜의 한셀에서의 채널지속시간을 평균한 것이므로

$$\frac{1}{\mu} = \frac{\lambda_n}{\lambda_n + \lambda_h} E[T_n] + \frac{\lambda_h}{\lambda_n + \lambda_h} E[T_h] \quad (24)$$

새로운 콜의 채널지속시간 T_n 의 PDF $f_{T_n}(t)$ 는

$$f_{T_n}(t) = \frac{1}{a T_m} \left[e^{-\frac{t}{T_m}} + \frac{1}{T_m} e^{-\frac{t}{T_m}} (a T_m - t) \right] \quad (25)$$

로 나타내어지며

$$E[T_n] = T_m(1 - P_{h_1}) \quad (26)$$

을 구할 수 있다. 마찬가지로 방법으로 PDF

$$f_{T_h}(t) = \frac{1}{T_m} e^{-\frac{t}{T_m}} \text{로부터 } E[T_h] \text{를 구하면}$$

$$E[T_h] = T_m(1 - P_{h_2}) \quad (27)$$

recursive method는 다음과 같다.

1. 주어진 λ_n, a 에 대하여 P_{h_1}, P_{h_2} 를 계산한다.
2. $r_h \neq 0$ 인 초기치를 임의로 잡고 식(24)으로부터 μ 를 계산한다.
3. 식 (19), (20)를 이용하여 시스템 상태확률 P_j 를 구한다. j 가 커질수록 $P_j \rightarrow 0$ 이므로 주어진 Tolerance 보다 작으면 절사한다.
4. 식 (21)과 (22)를 이용하여 P_{b_1} 과 P_{b_2} 를 구한다.
5. P_{b_1} 과 P_{b_2} 는 다시 식 (18)에서 r_h 를 구하는데 이용한다. r_h 값이 일정한 값에 수렴하면 Iteration을 중지한다.

4-3 LEO 위성시스템 링크분석

LEO 이동시스템은 위성 상하항링크와 ISL링크가

직렬로 연결한 큐잉모델로 해석할 수 있으며 위성 상하향링크에서 출력 처리된 트래픽 파라메타는 ISL 링크에 입력파라메타로 생각할 수 있다. 그림 1에서 보는 바와같이 하나의 O-D링크연결에는 동일빔내의 O-D쌍이 모두 존재하지 않는다면 두개의 위성상하향 링크와 하나의 ISL링크 경로가 필요하고, 동일빔 내에 O-D쌍이 모두 있을 경우에는 위성 상하향링크 한 회선이 필요하다. 하나의 위성에 요구되는 평균 총트래픽량 λ 는 새로운 콜과 핸드오버 콜로서 표시되며 상하향링크의 채널상태에 따라 그림 6과 같이 달라진다. 따라서

$$\lambda = \sum_{l=0}^{\infty} \lambda(l) P_l, \quad (28)$$

여기에서

$$\lambda(l) = \begin{cases} \lambda_n + \lambda_h & 0 \leq l \leq L_1 - 1 \\ \lambda_h & L_1 \leq l \end{cases} \quad (29)$$

LEO 위성시스템 전체에서 새로운 콜의 블록킹 확률 P_{BS} 는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} P_{BS} &= \left(\frac{N_s - 1}{N_s} \right) [1 - (1 - P_b)^2 (1 - P_{BL})] \\ &\quad + \frac{1}{N_s} [1 - (1 - P_b)^2] \quad (30) \\ &= 1 - (1 - P_b)^2 \left[1 - \left(\frac{N_s - 1}{N_s} \right) P_{BL} \right]. \end{aligned}$$

윗식에서 첫항은 O-D쌍이 동일빔에 위치하지 않는 경우의 확률을 나타내고 있고 둘째항은 동일빔에 위치할 경우 ISL링크가 필요없는 회선연결을 반영한 것이다.

LEO 위성시스템의 핸드오버는 위성의 모빌리티에 의한 빔 핸드오버와 ISL링크 핸드오버로 구성된다. 빔 핸드오버 확률은 상하향링크에 발생하는 핸드오버 파라메타 λ_n, λ_h 와 핸드오버 확률 P_{h1}, P_{h2} 에 의해서 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$P_{HO} = \frac{\lambda_n}{\lambda_n + \lambda_h} P_{h1} + \frac{\lambda_h}{\lambda_n + \lambda_h} P_{h2} \quad (31)$$

빔 핸드오버는 O위성과 D위성 공히 독립적으로 일어나므로 두 해당위성의 빔 핸드오버 여부에 따라서 ISL링크 connectivity에 변화가 발생한다. 따라서 변화에 따르는 새로운 ISL링크 핸드오버를 시도하여야 한다. 그러므로 ISL링크 핸드오버 발생이후에도

링크가 단절되지 않으려면 새로운 ISL링크 경로가 존재하거나 O위성과 D위성이 동일하게 되어 ISL링크가 더 이상 필요하지 않을 두가지 경우이다. 그 어느 경우이든 서로 독립적인 O위성과 D위성의 핸드오버가 적어도 한 곳에서 발생하며 핸드오버가 성공해야 한다.

P_{SHO} 를 위성시스템 전체 핸드오버가 일어나고 새로운 링크할당이 이루어질 확률이라고 하면

$$P_{SHO} = P_{NL} [P_{HO}^2 (1 - P_b)^2 + 2P_{HO}(1 - P_{HO})(1 - P_b)] \quad (32)$$

로 나타낼 수 있다.

식(32)의 우변항에 표시된 P_{NL} 은 새로운 링크설정에서 ISL링크의 필요여부에 따라서 고려된 factor이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{NL} = \frac{1}{N_s} + \frac{N_s - 1}{N_s} (1 - P_{BL}) \quad (33)$$

식 (32)의 bracket으로 표시된 항은 O위성과 D위성 모두 빔핸드오버가 발생시와 두 위성중 어느 한 위성만 빔핸드오버 발생시에 링크가 단절되지 않을 확률들을 나타낸다.

마찬가지로 LEO 위성 시스템의 강제 종결 확률 P_{FT} 는

$$\begin{aligned} P_{FT} &= 2P_{HO}(1 - P_{HO})[1 - (1 - P_{HO})P_{NL}] \\ &\quad + P_{HO}^2 [1 - (1 - P_{HO})^2 P_{NL}] \quad (34) \end{aligned}$$

로 표시된다.

위식은 P_{SHO} 와 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} P_{FT} &= (1 - P_{SHO}) - (1 - P_{HO})^2 \\ &= 2P_{HO} - P_{HO}^2 - P_{SHO} \quad (35) \end{aligned}$$

식 (35)의 첫번째 항은 핸드오버가 발생하고 새로운 링크할당이 실패할 확률 외에 핸드오버가 전혀 발생하지 않을 확률이 포함되므로 후자를 다시 차감하여야 한다.

V. 시뮬레이션 결과분석

이리돔 시스템(M=6,N=11)을 모델로 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7-8은 상하향링크에서, 그림 9-12는 ISL Link, 그리고 그림 13-14는 위성시스템 전체에서

의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 7-8은 상하향 링크 채널수 L_g 가 10일 때 L_1 과 ρ 에 따른 상하향 링크에서의 새로운 콜 블록킹 확률(P_{b1})과 핸드오버 콜 블록킹 확률(P_{b2})을 나타낸 것이다. 채널 수 L_1 은 새로운 콜의 가용채널수이므로 L_1 이 작을수록 P_{b1} 은 커지고 상대적으로 P_{b2} 는 작아지게 된다. 이상적인 통신을 위해선 P_{b1} 과 P_{b2} 는 모두 작은 값을 가져야 하나, 동시에 최소로 하도록 설계하기는 어렵다. 트래픽 밀도가 주어지면 설계 파라미터 P_{b1} 과 P_{b2} 를 만족하는 L_1 값을 찾을 수 있다. 예를 들면 ρ 가 3이하에서 $P_{b1} < 0.1$, $P_{b2} < 10^{-4}$ 을 동시에 만족하는 L_1 값은 7이다. 이와 반대로 주어진 P_{b1} 과 P_{b2} 에 대하여 트래픽밀도를 만족하는 상하향링크 채널 수 L_g 를 설계할 수 있다. P_{b2} 는 전 트래픽밀도 구간에 대하여 낮은 값을 유지하고 있으며 $\rho = 10$ 일 때에도 $L_1 = 8$ 에서 8.5×10^{-3} 이다.

ISL링크에서의 블록킹 확률을 링크 트래픽밀도의 함수로 표시하여 ISL링크 채널 수가 상하향링크 채널수 보다 작은 경우($L_s=4,6,8$)는 그림 9에, 클 경우($L_s=10,12,14$)는 그림 10에 각각 나타내었다. 그림 9-10을 기초하여 L_s 와 트래픽밀도의 상대적 증가를 나타내기 위해 P_{b2} 가 각각 0.2, 0.4일 때 L_s 와 ρ 의 값을 정리하면 다음과 같다.

표 1. L_s 대 트래픽밀도의 상대비

L_s	ρ	L_s/ρ	L_s	ρ	L_s/ρ
4	2.8	1.43	4	2.8	1.43
6	5	1.2	6	5	1.2
8	7	1.14	8	7	1.14
10	9.5	1.05	10	9.5	1.05
$P_{b2}=0.2$			$P_{b2}=0.1$		

표1에서 본 바와 같이 L_s/ρ 의 상대비는 L_s 가 커질수록 작은 값을 가지며 따라서 ISL 회선수가 증가할수록 트래픽 수용 효율이 좋아짐을 알 수 있다.

각 위성링크에 실제로 걸리는 트래픽부하 λ_{L1} 은 Uplink로 들어오는 소스 트래픽 λ 와 Transit 트래픽이 합해져서 발생하며 (M,N)값에 따라서 변한다. IRIDIUM(M=6, N=11)의 경우와 유사한 (M,N)쌍에 대하여 상대비 λ_{L1}/λ 는 증가하지만 위성빔당 접속을 원하는 소스 트래픽 λ 는 빔관할면적에 비례하여 감소한다. 그러므로 링크 트래픽 발생량을 비교하면 (M,N)의 크기가 커질수록 줄어드는 효과가 있으나, 링크할당 복잡도도 함께 증가하게 된다(그림 11).

그림 12는 ISL링크의 모든(O,D)쌍에 대하여 평균

적으로 콜이 블록킹될 확률을 나타낸 것이다. 그림 10과 비교할 때 비슷한 형태의 곡선을 그리고 있으며 다만 P_{b1} 이 P_{b2} 보다 작은 값을 취하는 이유는 (O,D)쌍의 대체경로가 존재하기만 하면 블록킹 되지 않기 때문에 링크 블록킹 확률이 크다하더라도 콜 블록킹될 확률이 작게된다.

그림 13은 $L_s \geq L_g$ 일 경우의 새로운 콜의 블록킹 확률을 나타낸 것이다. $\rho < 5$ 에서는 P_{b2} 는 0.02이하의 값을 가지며 $L_s=14$ 일 때 매우 만족스러운 커브를 나타내고 있다.

그림 14에 나타낸 강제 종료 확률 곡선은 시스템 전체에서의 On-going콜의 핸드오버특성을 나타낸다. 그림 13의 새로운 콜의 블록킹 확률과 비교할 때 모든 트래픽에 대하여 $P_{F1} < 0.4 P_{b2}$ 임을 알 수 있다.

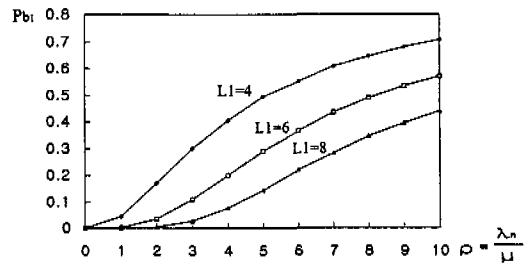


그림 7. $L_g : 10$ 일때 상하향링크에서의 새로운 콜의 블록킹 확률

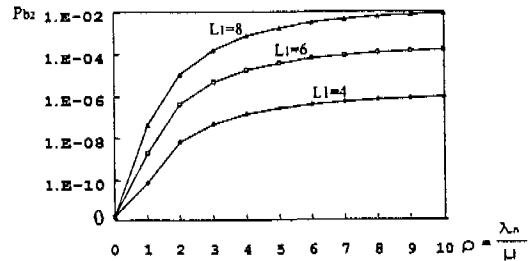


그림 8. $L_g : 10$ 일때 상하향링크에서의 핸드오버 콜의 블록킹 확률

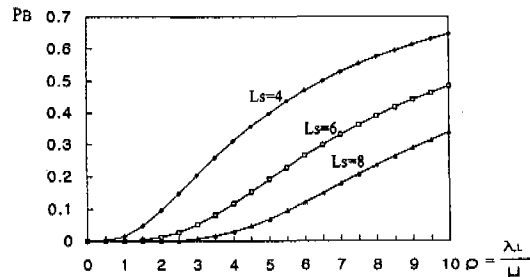


그림 9. $L_g : 10, L_1 : 8$ 일 때 ISL에서의 링크 블록킹 확률

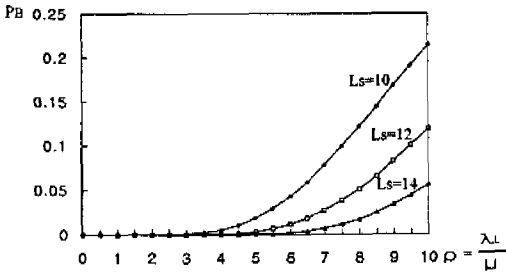


그림 10. $L_g : 10, L_1 : 8$ 일 때 ISL에서의 링크 블로킹 확률

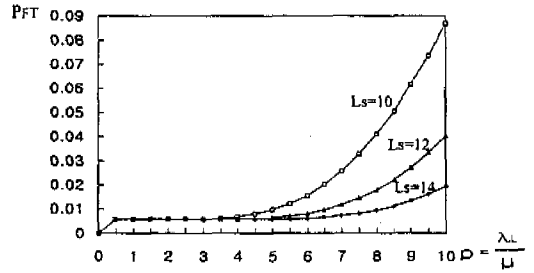


그림 14. $L_g : 10, L_1 : 8$ 일 때 LEO 위성시스템 전체에서 강제 종결 확률

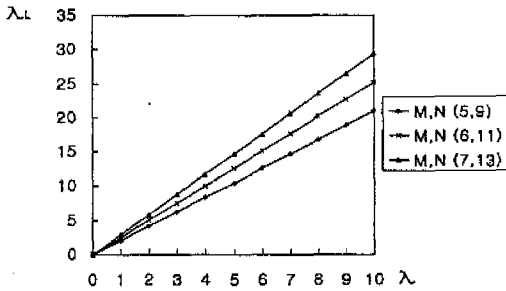


그림 11. $L_g : 10, L_1 : 8$ 일 때 λ 에 따른 λL 변화

VI. 결론

지금까지 본 논문에서는 위성간 링크를 갖는 극저궤도 이동 위성 통신 시스템에서 각 위성과 각 링크에 균일한 트래픽을 갖는 시스템의 성능 분석을 위해 각 링크에 도달하는 트래픽, 링크 블로킹 확률, 콜 블로킹 확률 등을 시뮬레이션을 통하여 구하였다. 그림에서 보는 바와 같이 트래픽이 많아질수록 링크 블로킹 확률이나 콜 블로킹 확률, 강제 종결 확률이 커짐을 알 수 있다. 새로운 콜 블로킹 확률을 감소시키기 위해서는 상하향 링크와 위성간 링크 각각에 할당된 채널중 많은 채널을 새로운 콜에 할당하므로써 감소시킬 수 있다. 하지만 새로운 콜보다는 이미 접속하여 사용중인 On-going 콜이 더 중요하므로 적절한 채널할당이 필요하다. ISL회선이 증가할수록 위성링크에 걸리는 트래픽량이 감소하여 트래픽 수용효율이 좋아짐을 알 수있다. 이와 관계되어 시스템내의 콜 블로킹과 강제종결확률도 좋아진다. ISL회선을 무한히 증가시키면 시스템효율이 좋아지지만 경제성에서 부담이 있으며 기술적 고찰이 필요시 되어 비합리적이다. 따라서 적절한 회선 선택이 필요하다. 향후과제로 Non-uniform 트래픽 상황에서의 성능 분석, 상하향 링크와 위성간 링크에 할당되는 채널이 동적일 때의 성능 분석, 그리고 단일빔내에 spot-beam을 가질 때의 성능 분석 등이 계속 연구되어야 하며 위성간 링크 기술로 서로 볼 수 있는 위성끼리의 링크가 가능한 Visibility Satellite Link가 고찰되어야 한다.

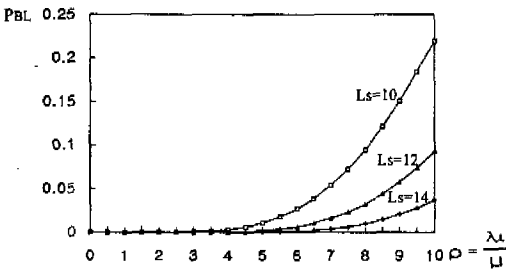


그림 12. $L_g : 10, L_1 : 8$ 일 때 ISL상의 평균 콜 블로킹 확률

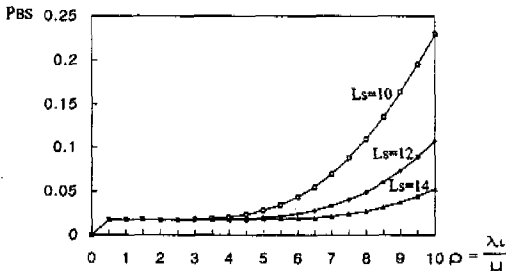


그림 13. $L_g : 10, L_1 : 8$ 일 때 LEO 위성시스템 전체에서 새로운 콜의 블로킹 확률

참고 문헌

- [1] S.S. Rappaport and L. R. Hu, "Microcellular Communication systems with hierarchical macrocell

overlays; traffic performance models and analysis," Proc.IEEE, vol. 82, no. 9, pp. 1383-1397, Sept. 1994.

[2] L. R. Hu and S.S. Rappaport, "Personal Communication Systems using multiple hierarchical cellular overlays," IEEE J. SAC, vol. 13, no. 2, pp.406-415, Feb. 1995.

[3] Masahumi Ohnuki, Masahiro Urnehira, etal, "A new Satellite Communication System integrated into public switched networks - DYANET," IEEE J SAC, vol. 10, no. 2, pp. 447-455, Feb. 1992.

[4] Mark A. Sturza, "Architecture of the TELEDESIC Satellite Systems," International Mobile Satellite Conference, IMSC '95 Ottawa, pp.212-218, June 1995.

[5] Yvette C Hubbel and L. Sanders, "A Comparison of the IRIDIUM and AMPS Systems," IEEE Network , pp.52-59, March 1997.

[6] Enrico Del Re, R. Fantacci, G. Giambene, "Performance Analysis of a Dynamic Channel Allocation Technique for Satellite Mobile Cellular Networks," International Journal of Satellite Comm. Vol. 12, pp. 25-32, 1994.

[7] E. Del Re, etal, "Handover and Dynamic Channel Allocation Techniques in Mobile Cellular Networks," IEEE Transactions on Vehicular Tech. Vol. 44, No. 2, May 1995.

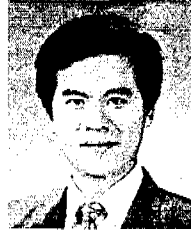
[8] Enrico Del Re, etal, "Efficient Dynamic Channel Allocation Techniques with Handover Queuing for Mobile Satellite Networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol 13, No. 2, pp. 397-405, Feb. 1995.

[9] Daehyoung Hong, Stephen S. Rappaport, "Traffic Model and Performance Analysis for Cellular Mobile Radio Telephone Systems with Prioritized and Nonprioritized Handoff Procedures," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT-35, No.3 Aug. 1986.

[10] 현병두, 양혁, 김덕년 "위성간링크를 이용한 이동위성 통신시스템의 call 블로킹 확률" 추계종합학술발표회 논문집, Vol. 12, No. 2, pp. 482-485, Nov. 1997

김 덕 년(Doug Nyun Kim)

정회원

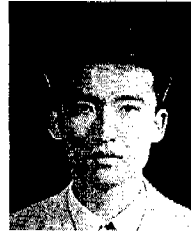


1975년 : 서울대학교 전기공학 (공학사)
 1981년 : SUNY at Stony Brook 전기공학(공학석사)
 1988년 Auburn Univ 전기공학 (공학박사)
 1979.12~1980. 5 : IBM Korea (시스템 엔지니어)

1984. 7~1985. 7 : 베릴랜드 大 (R.A)
 1985. 9~1988. 8 : Auburn 大 (R.A & T.A)
 1988. 9~1995. 2 : 한국전자통신연구소(실장, 책임연구원)
 1995. 3~현재 : 명지대전자정보통신공학부정보통신 연구센터 소장 / 조교수
 <연구분야> 이동위성통신, 이동통신, 초고속 위성통신. 무선통신

김 영 준(Young Jun Kim)

준회원



1988년 2월 : 명지대학교 정보통신공학과 졸업(공학사)
 1988년 3월~현재 : 명지대학교 전자정보통신공학부 석사과정
 <관심분야> 위성통신, 이동통신, ATM 교환기