

저속 주파수 도약 방식 위성 데이터링크에서 송수신 신호중첩 및 주파수 다이버시티 적용

정희원 김 기 근^{*o}, 이 민 우^{**}, 종신회원 임 재 성^{***}

A Slow Frequency Hopping Transmission Method using Carrier Superpositioning and Frequency Diversity for the Satellite Datalink

Kikeun Kim^{*o}, Minwoo Lee^{**} *Regular Members*,
Jae-sung Lim^{***} *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 주파수 도약방식에서는 적용이 어려운 송수신 중첩통신 방식을 DSM형 증계기를 사용하는 위성 데이터링크에 적용하고, 항재밍 성능 개선을 위해 잔여 주파수 자원을 주파수 다이버시티에 활용하는 방안을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 제안한 방식에 대한 항재밍 성능과 탐지회피 성능을 분석하였다. 항재밍 성능 분석 결과, 주파수 다이버시티 적용으로 데이터 통신시 18.5dB의 처리이득을 얻을 수 있으며, 500MHz 도약 방식에서 통신단 말형태의 재머에 대해 4.8Mbps의 데이터 전송이 가능함을 확인하였다. 또한, 주파수 중첩에 의해 주파수 자원을 최대 2배까지 재사용 가능하며, 데이터 속도를 추정 할 수 있는 D&M 검출기를 대상으로 중첩을 하지 않았을 때 보다 2.5dB LPI 성능이 개선됨을 확인하였다.

Key Words : Carrier Superpositioning, Frequency diversity, SFH, DSM, Anti-jamming, LPI

ABSTRACT

In this paper, we propose a possibility of usage of carrier superpositioning scheme for a specific slow frequency hopping(SFH) transmission method for the satellite data link in which all of hopping carriers have to be synchronized to DSM transponder of our previous work and usage of frequency diversity in the saved frequency to overcome the SFH disadvantage against jammer. We have analyzed anti-jamming performance and LPI performance and confirmed that the proposed scheme can support data service with 18.5dB processing gain against the worst case partial band jamming and give 2.5dB gain in the LPI performance against D&M detector which can estimate the data rate of unknown signals.

I. 서 론

음성이나 단문 메시지로 충분했던 기존의 작전환경이 네트워크 중심전에서는 각각의 체계가 데이터링크를 통해 IP 기반의 다양한 전술/전략 메시지와 영상 서비스를 제공하는 네트워크를 구성하는 개념으로 진

화하고 있다. 이러한 네트워킹을 위해서는 전술지역이나 전략 지휘소의 구분 없이 seamless한 그물망 구성을 지원하고 전후방의 지역 구분이 없는 백본이 필요하다. 위성통신 전 전장지역을 대상으로 광역 통신을 제공하기 때문에 그 중요성이 커지고 있다.

군 위성통신에서는 광역의 통신영역에서 발생 가능

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2011-(C1090-1121-0011))

* 국방과학연구소(kikeun@add.re.kr), (° : 교신저자)

** 아주대학교 NCW학과(iminu@ajou.ac.kr), *** 아주대학교 국방기술네트워크(jaslim@ajou.ac.kr)

논문번호 : KICS2011-07-312, 접수일자 : 2011년 7월 19일, 최종논문접수일자 : 2011년 10월 28일

한 통신방해와 감청을 극복하기 위해, 전송 효율을 높이기보다는 수십 dB의 처리이득을 제공하는 통신방식이 사용되고 있다. 그러나 위성통신의 활용범위가 음성 서비스 중심의 회선교환 방식에서 광대역 전송 및 패킷 서비스로 전환하면서 이에 맞는 기술 개발이 요구되고 있다.

최근 IP 패킷 전송에 적합하고 위성의 단점인 주파수 자원의 제한을 극복할 수 있는 기술들이 개발되어 표준화 되고 있다. 이러한 표준에는 유럽전기통신표준화기구 (ETSI : European Telecommunications Standards Institute)가 주관하고 있는 DVB S2/RCS (Digital Video Broadcasting Satellite version 2/Return Link via Satellite)가 대표적이며, TDM/TDMA (Time Division Multiplexing/Time Division Multiple Access) 방식으로 가변 전송률, 요구할당 전송방식에 적합하며, ACM (Adaptive Coding and Modulation) 기술로 채널에 적응하여 최적의 전송율을 지원하고 있다. 또한 APSK (Amplitude Phase Shift Keying), LDPC (Low Density Parity Check)와 같은 변조나 코딩방식도 전송율을 극대화하는데 기여하고 있다. 또한 송신한 신호는 수신단말 뿐만 아니라 송신단말도 수신할 수 있다는 위성통신의 특징을 이용하여 송수신 중첩통신기술 (PCMA(Paired Carrier Multiple Access) 또는 CIC (Carrier in Carrier))이 개발되었다.

송수신 중첩통신은 Denkerberg가 제안한 이래 많은 연구가 진행되었다.^[1] Ichikawa는 송신된 데이터를 지연시킨 후 변조하여 위상, 이득 등을 맞추는 방식으로 제거하려는 기준 신호를 만드는 방법을 제안하였다.^[2] Kobashi는 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 와 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 변조방식에서 중첩신호를 복조후 검파한 신호를 다시 변조하여 송신기준신호를 만드는 방법으로 신호의 round trip 지연 측정이 필요 없는 기법의 중첩통신 방안을 제안하였다.^[3] Jayasimha는 비선형 중계기로 왜곡된 신호에서 적용방안을 제안하였다.^[4] He는 수신된 신호에서 송신신호를 추정하기 위한 파일럿을 사용하여 Hub-Spoke에 적용할 수 있는 기법을 제안하였다.^[5] 그리고 Agne는 CIC를 미 군사위성을 이용하여 MPSK (Multiple PSK) 변조방식을 사용하여 주파수 재사용 가능성을 실험으로 입증하였다.^[6] 그리고 Rossetto는 이를 PNC (Physical Layer Network Coding)의 하나로 해석하여 기존의 수동중계기를 사용하는 신호레벨의 PNC와 능동중계기를 사용하는 비트레벨의 PNC의 성능을 비교하였다.^[7]

수십 dB의 처리이득을 갖으면서 영상급 전송을 가

능하게 하기 위한 주파수 도약방식은 심벌 전송율이 도약속도보다 높은 저속도약방식(SFH : Slow Frequency Hopping)를 사용하여야 한다. 고속도약방식은 고속율에 비례하여 심벌 대역폭이 증가할 뿐만 아니라 도약주파수 합성기의 스위칭 속도의 한계로 불가능하다고 할 수 있다. 이러한 전송방식에서는 재밍을 당한 슬롯은 슬롯 내 수십~수백개의 심벌이 모두 재밍을 당하게 되어 인더리빙으로 랜덤하게 분산하기에는 지연이 너무 크거나 에러정정의 한계로 전송이 불가능한 단점을 갖는다. 또한 주파수 도약 방식에서는 송신 및 수신 신호간 주파수와 타이밍을 맞추기가 어려워 송수신 신호 중첩을 적용하는 것이 제한이 된다.

본 논문에서는 DSM (Demux, Selective CH switch, and Mux)^[8]형 중계기를 사용하는 저속 주파수 도약 전송방식의 경우 위성에 송수신 신호가 동기를 이루기 때문에 송수신 신호 중첩통신이 적용 가능함을 확인하였다. 그리고 중첩통신 적용에 의한 여유 주파수에 송신 신호를 다시 보냄으로써 주파수 다이버시티 효과를 얻는 방안을 제안한다. 이로써 주파수 자원의 추가 사용 없이 저속 주파수 도약의 한계를 극복할 수 있다. 이때 사용하는 전송방식 및 DSM형 중계기는 기존 제안한 위성통신용 데이터링크 웨이브폼을 사용하였다^[8].

제안하는 중첩통신에서의 주파수 다이버시티 전송 방식을 기존 제안 위성 데이터링크에 적용하여 부분 대역 재밍 환경에서의 항재밍 성능 개선을 분석하였다. 그리고 제안하는 주파수 중첩통신으로 인해 부가적으로 LPI (Low Probability of Interception) 성능도 개선됨을 보이기 위해 에너지 검출기와 데이터 속도 검출기의 경우에 대해 LPI와 LPD (Low Probability of Detection) 성능을 비교 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 주파수 도약 방식에서 송수신 신호 중첩과 주파수 다이버시티 전송방식에 대해 고찰하고 가능성 및 제안내용을 기술한다. III장에서는 DSM형 중계기 및 기존 제안 전송방식에 제안하는 개선 내용을 적용 후 군 위성통신에서 중요한 요소인 항재밍 성능과 저피탐 성능을 분석하여 결과를 제시한다.

II. 송수신 신호 중첩과 주파수 다이버시티 전송방식

2.1 송수신 신호중첩 전송방식

위성통신은 정지궤도에 위치한 중계기를 경유하는

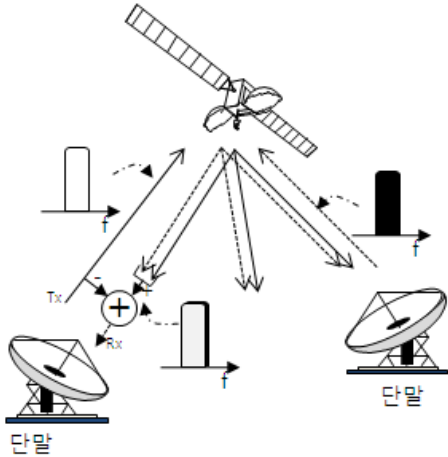


그림 1. 위성에서 송수신 중첩 전송 개념

링크를 구성하기 때문에 1m의 반사판형 위성 안테나로도 천km이상의 통신영역을 제공한다. 그러므로 대부분의 서비스는 동일 빔 내에서 이루어지며, 이때에는 위성통신이 방송과 같은 특성이 있으므로 위성단말이 송신한 신호를 다시 수신할 수 있는 (다른 통신 시스템에서는 불가능한) 물리적인 구조가 가능하다. 이러한 특징을 이용하여 송신 신호와 수신 신호를 같은 주파수에서 사용하더라도, 단말은 이미 자신의 송신 신호를 알고 있기 때문에 수신 신호에 포함된 자신의 송신 신호를 제거함으로써 수신신호를 복원할 수 있다.

이러한 전송방식은 FDMA (Frequency Division Multiple Access) 또는 TDM /TDMA에서 양방향 또는 단방향으로의 활용 가능성이 입증되었다.¹²⁻⁶ 그러나 주파수 도약 통신방식의 경우 심벌이 여러 홉을 통해 도약하는 고속주파수도약 (FFH : Fast Frequency Hopping)에서는 홉단위로 중첩되어야 하므로 원칙적으로 불가능하다. 저속주파수도약에서는 송신 및 수신 시간의 동기가 맞는 것이 아니기 때문에 송수신 주파수를 동일하게 갖는 시간이 제한된다. 이를 확인하기 위해 정지궤도 위성과 단말간의 시간 지연은 다음과 같이 구할 수 있다.

먼저 단말의 위도 ϕ 와 단말과 위성의 경도차 ω 인 경우 위성과 단말과의 거리는

$$d = \sqrt{h^2 + 2R_E(R_E + h)(1 - \cos \phi \cos \omega)} \quad (1)$$

이다 (RE : 지구 반지름(6,378Km), h : 위성 고도 (35,786km)). 이때 시간지연은

$$T = d/c[\text{sec}], c = 3 \cdot 10^8 \text{m/sec} \quad (2)$$

와 같다.

이를 그림 2와 같이 한반도 중심으로 도시하면 한반도 내에서도 시간지연 차이가 3msec가 있음을 알 수 있다. 이는 도약속도가 10khps라 하더라도 30홉의 차이가 있으므로 송신과 수신간의 홉동기를 맞추는 것이 어렵다는 것을 알 수 있다. 즉 반송 주파수 변화가 랜덤하다고 가정하면 평균적으로 송신 슬롯과 수신 슬롯의 주파수가 슬롯의 반 주기에서 동일할 것이다.

그러나 위성에서 간섭신호 제거를 위해 중계기 (DSM)¹⁸⁾를 경유하는 경우에는 위성 중계기의 도약 슬롯에 동기를 맞추어야 한다. 그러므로 위성과의 전송 거리에 따라 시간 지연이 차이가 있더라도 모든 단말이 동기를 맞추어 송수신하는 구조이다. 따라서, 이러한 경우 송신된 신호나 수신된 신호는 그림 3과 같이 위성에서 동기를 이루므로, 수신지역에 따라 Δt 의 지연이 상이하더라도 주파수 중첩통신이 가능하다. 즉, 송신신호와 수신신호의 홉간 지연차는 각 위성단말이 위성을 기준으로 발생하므로, 각 단말이 전송 시 이러한 오차를 고려하여 신호를 송신하기 때문에 신호중첩 전송에는 영향이 없다.

제안하는 주파수 중첩방식은 이러한 중계기 구조에서 슬롯내의 동기용 심벌로 전송된 신호의 지연과 신호왜곡을 추정한 후 중첩된 신호에서 송신 신호를 제

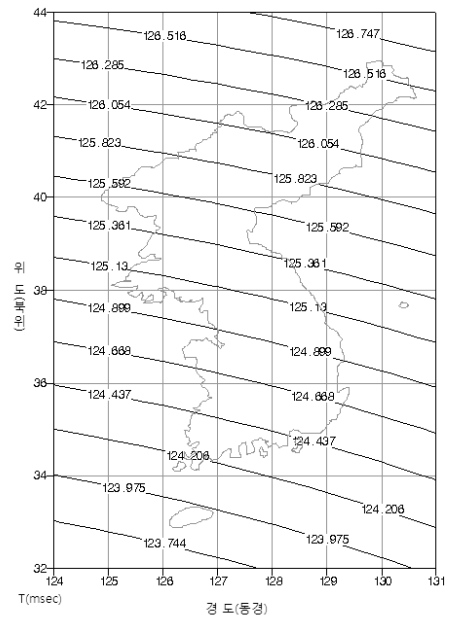


그림 2. 위성과 단말간 거리차에 따른 시간지연(예)

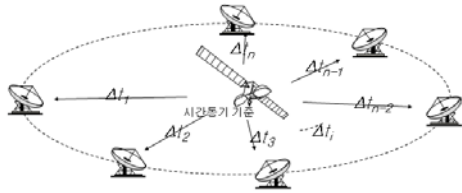


그림 3. 위성기준 동기구조

거하는 것이다. 이러한 절차는 매 홉마다 이루어지며, 이때 망제어기에서 각 통신단말에 같은 도약 시퀀스 정보를 할당하며, 패킷 통신을 하기 때문에 수신 패킷의 송신 주소가 다를 수 있다. 또한 한 슬롯 내에서는 PTP (Point To Point)나 Hub/Spoke 형태의 링크 모두 지원이 가능하다.

2.2 주파수 다이버시티 전송방식(FD)

영상급 고속 데이터를 주파수도약 방식에서 전송하기 위해서는 도약속도보다 심벌속도가 높은 저속 주파수도약이어야 한다. 위성에서 고이득의 에러정정을 위해 사용하는 LDPC나 Turbo code는 코드길이가 성능에 따라 비례하여 수천 심벌까지 사용된다. 그런데, 그림 4와 같이 수십 ~ 수백 심벌이 사용되는 한 슬롯이 모두 재밍을 당하는 경우, 재밍에 의해 전체 심벌이 에러를 발생할 수 있기 때문에 결과적으로 많은 패킷의 재전송을 야기할 수 있다. 이 때문에 재밍에 의한 비트 에러를 인터리빙으로 랜덤하게 확산시키기에 어려움이 있다.

이러한 저속주파수 도약의 제한사항을 극복하고자 주파수 중첩전송을 하고 남은 주파수로 같은 신호를 송신하는 주파수 다이버시티 전송 방식을 제안한다. 송수신 신호 중첩에서 주파수 다이버시티의 스펙트럼은 그림 5와 같은 예가 가능하다.

그림 5에서 송신신호(백색 신호)가 수신신호(흑색 신호)가 각 슬롯에서 겹쳐있으며, 같은 송신신호 및 수신신호가 다른 주파수(슬롯)에서 송신 또는 수신된다. 이때 재밍된 슬롯이 있더라도 같은 정보를 갖는 다른 슬롯에서 이를 복원가능하며, 이때 같은 정보를 갖는 신호가 있기 때문에 전력의 변화 등을 이용하여

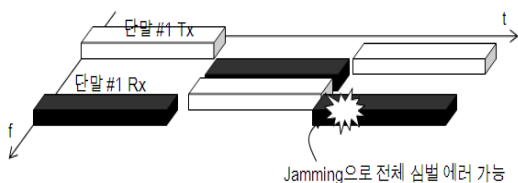


그림 4. 저속 주파수도약에서 재밍상황

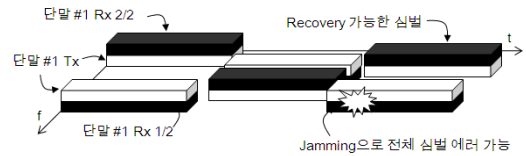


그림 5. 송수신 중첩과 주파수 다이버시티

재밍의 유무를 알 수 있다고 가정한다. 이러한 신호중첩을 이용한 주파수 다이버시티를 적용하면 위성의 주파수 자원을 최소화 하면서 고속 영상급 데이터를 항재밍 능력을 제공하면서 전송할 수 있다. 그러나 2배의 송신전력이 필요하고 또한 수신단도 2개이므로 복잡한 구조여야 한다.

다음 장에서는 기존 제안한 위성통신용 데이터링크 웨이브폼을 사용하여 본 논문에서 제안한 방식에 대한 항재밍 성능과 저피탐 성능을 분석한다.

III. 분석 및 고찰

3.1 항재밍 성능분석

GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) 변조방식을 동기검파를 하였을 경우에 대한 BER 성능은 Kazuaki Murota 등에 의해 아래 식과 같이 표현할 수 있다.^[9]

$$P_c = Q\left(\sqrt{\frac{2\alpha E_c}{N_0}}\right) \quad (3)$$

$$\alpha = \begin{cases} 0.68, & \text{GMSK with } BT = 0.25 \\ 0.85, & \text{MSK with } BT \rightarrow \infty \end{cases}$$

여기서 BT 는 일반적으로 1, 0.5, 0.25 등을 사용할 수 있지만 대역폭 효율 개선을 위해 본 논문에서는 0.25를 사용하였다.

그리고 E_c 는 칩의 평균 에너지이고, N_0 는 잡음전력 밀도이고, 함수 Q 는 다음과 같이 정의된다.

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \quad (4)$$

그리고 (n, k) RS 디코딩을 사용하는 웨이브폼으로 심벌 에러율은 다음 식과 같이 다시 쓸 수 있다.^[10]

$$P_s \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i \binom{n}{i} P_c^i (1 - P_c)^{n-i} \quad (5)$$

$$P_b = \frac{J}{n} \left[|E_J| P_s^J (1 - P_s)^{n-J} + \sum_{i=J+1}^{N_o-1} |E_J| \binom{n-J}{i-J} P_s^i (1 - P_s)^{n-i} \right] + \frac{M}{n} \left[|E_J| \binom{n-J}{N_o-J} P_s^{N_o} (1 - P_s)^{n-N_o} + \sum_{i=N_o+1}^n \binom{n}{i} P_s^i (1 - P_s)^{n-i} \right] \quad (6)$$

여기서 t 는 $(n-k)/2$ 로 최대 정정 에러 비트 수를 나타내며, Link 16의 경우는 $n=31, k=15$ 이다.

이를 LDPC code에 의해 식 (6)과 같은 BER 성능을 갖는다.^[11]

항재밍 성능을 분석하기 위해 가정한 부분대역 재머는 도약주파수 대역의 일부분 ($\rho, (0 < \rho < 1)$)을 재밍하는 방식으로 도약대역 W_{FH} 에 재밍 대역 W_J 의 경우

$$\rho = \frac{W_J}{W_{ss}} \text{이며, 스펙트럼 분포는 그림 6과 같다.}$$

여기서 재머 전력 J 는 재밍대역에서의 밀도가 ρ 비율로 아래 식과 같이 증가하게 되어 재머는 재밍 효율을 높일 수 있다.

$$\frac{J}{\rho W_{FH}} = \frac{J_o}{\rho}, \frac{E_b}{J_o/\rho} = \frac{\rho E_b}{J_o} \quad (7)$$

이때 BER 성능은 재밍을 당한 때와 당하지 않은 때로 분리하여 평균적으로 다음과 같이 구할 수 있다.^[12]

$$P_j = \rho P_b (E_b / (N_o + J_o)) + (1 - \rho) P_b (E_b / N_o) \quad (8)$$

여기서 P_b 는 식 (6)을 사용할 수 있다.

그리고 2배 다이버시티를 갖는 구조는 부분대역 ρ 의 재밍환경에서 다음과 같은 BER 식을 갖는다.^[13]

$$P_{FD} = \rho^2 (P_j + 1) P_j (1 - P_j) \quad (9)$$

앞의 식을 사용하여, 본 논문에서 제안된 송수신 신호 중첩 방식에서의 주파수 다이버시티의 성능을 부

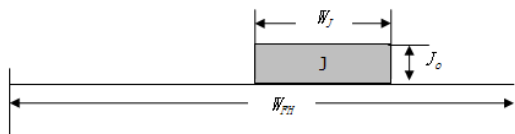


그림 6. 부분대역 재밍 환경 스펙트럼 예

분대역 환경에서 구할 수 있다. 이때 항재밍 성능 위주로 분석하기 위해 송수신 신호 중첩 신호에서 수신 신호를 복원하는 손실은 없는 것으로 가정한다. 그리고 LDPC ($J=3, E_j=192, N_o=38, M=143.93, n=1008, \text{Rate}=1/2$), RS($n=31, k=15$)를 적용하여 BER 성능을 분석하여 그림 7과 같이 GMSK 변조와 LDPC/RS 코딩을 한 웨이브폼(기준)과 비교하였다.

분석결과 기존 방식은 ρ 가 0.02에서 $1E-3$ 의 BER을 지원하지 못하지만 제안 방식은 18.5dB의 비트에너지대 재머잡음 전력밀도비에서 $1E-6$ 의 데이터 통신이 가능한 BER을 지원할 수 있는 것을 알 수 있었다. 이때 기존 방식에서 신호전력을 약 2dB 높이면 데이터 통신이 가능할 것으로 보이나 재머가 ρ 를 낮추어 재머 전력 밀도를 높이면 쉽게 통신을 방해할 수 있다. 이러한 결과는 우리가 제시한 논문^[8]의 처리이득이 ρ 가 0.00001일 때 52dB인 경우와 비교하면 많은 개선이 있게 되는 것임을 알 수 있다. 그리고 ρ 가 1인 경우에는 다이버시티 효과가 없어서 아무런 이득이 없음을 알 수 있다.

이러한 성능개선을 효과를 DSM 중계기를 적용한 실제 환경에서 분석하였다. 이때 도약대역폭을 500MHz, 채널대역폭은 양방향으로 전송형 영상정보 서비스가 가능한 108kbps (LET (Link-16 Enhanced Throughput) Message type 3기준)를 가정하여, 사용자가 10인 경우에 대해 부분대역 재밍 환경에서 BER

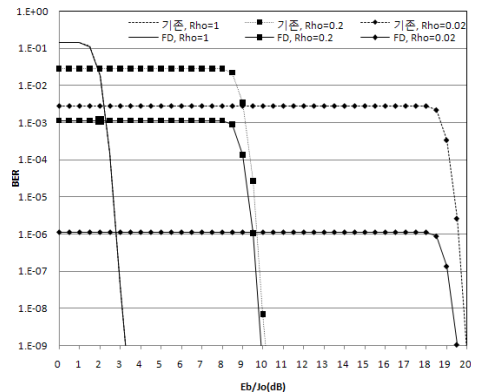


그림 7. FD 방식의 부분대역 재밍에서 BER 성능

성능을 분석하여 그림 8과 같이 다이버시티를 적용하지 않은 경우(기준)와 비교하였다.

분석결과 주어진 조건에서는 신호대 재머전력비가 약 -16.5dB에서도 데이터 통신이 가능하여 기존의 방식으로는 음성서비스도 못하는 경우에 대비해 많은 성능 개선결과를 보인다. 제안한 방식의 경우 같은 규모의 재머의 경우에는 전송속도를 4.8Mbps까지 전송이 가능한 환경이 된다. 또한 재머는 도약대역폭의 2% (여기서는 10MHz)까지는 재밍을 해야 하므로 기존연구의 0.001% (ρ 가 0.00001)인 5kHz CW (Continuous Wave)성 재밍과 비교하면 재밍 신호 발생의 어려움을 야기할 수 있다.

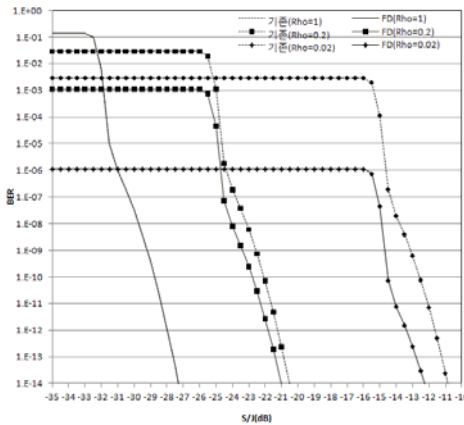


그림 8. FD 방식의 항재밍 성능 이득

3.2 탐지회피 성능 분석

제안하는 신호중첩 방식은 주파수 자원을 최대 2배 재사용할 수 있다는 장점이 있을 뿐 아니라 상관도가 없는 두 개의 신호가 중첩되어 통신신호의 정보를 탐지를 어렵게 하는 이점이 예상된다. 이를 확인하는 방법으로 신호 정보탐지는 신호 유무로 트래픽 상황을 유추하려는 시도에 대응하는 LPD와 신호의 심벌속도, 변조방식, 도약속도, 도약 슬롯 수등 신호특징을 검출하여 다음 단계인 감청이 가능할 수 있도록 시도하는 것에 대응하는 LPI가 있을 수 있다.

일반적으로 LPD는 신호의 에너지를 검출하여 신호 유무 즉 트래픽의 유무를 판단하며 가장 일반적인 방법이 Wideband Radio meter(WR)를 사용하는 것이다. 그림 9는 이러한 WR의 구성도이다.^[14]

수신된 신호를 신호가 있을 것으로 예상되는 대역폭 (W)을 갖는 여파기로 거른 후 주기 T 동안의 에너지를 측정 후 기준치 (V_T)와 비교하여 신호 유무를

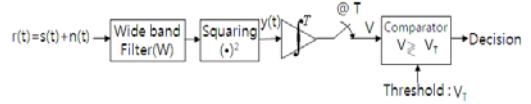


그림 9. Wideband Radio meter 구성도

추정한다. 이러한 수신기는 AWGN 환경에서 주어진 입력 SNR로 가장 큰 출력 SNR을 만든다는 점에서 최적의 검출구조로 알려져 있다. 이때 Urkowitz는 $2V/N_0$ 의 확률분포함수 (PDF)는 잡음만 있는 경우는 $2TW$ 의 자유도를 갖는 Chi-square 분포를 갖는 것으로, 신호에 잡음이 부가된 경우는 $2TW$ 의 자유도와 비중심이 $2E/N_0$ 인 비중심 Chi-square 분포를 갖는 것으로 모델링할 수 있다.^[15,16] 이때 N_0 는 대역폭 W 으로 대역제한된 잡음전력밀도이며, E 는 T 기간 동안의 신호 에너지이다.

WR 검출기에 대해 $TW=10$, $2E/N_0$ 가 13dB일 때 예로 하여 각 $2V/N_0(=y)$ 의 잡음만의 경우는 $P_N(y)$, 잡음과 신호는 $P_{NS}(y)$ 인 PDF를 아래 그림 10과 같이 도시하였다. 이때 y 가 $2V_T/N_0$ 인 경우 이를 기준으로 신호 유무를 정확히 검출할 확률 (P_D)과 검출오류 확률 (P_{FA})은 그림의 영역을 갖는다.

그러므로 P_D 와 P_{FA} 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$P_D = \int_{2V_T/N_0}^{\infty} P_{SN}(y) dy \quad (10)$$

$$P_{FA} = \int_{2V_T/N_0}^{\infty} P_N(y) dy \quad (11)$$

이 식을 이용하여 시뮬레이션을 통해 주파수 중첩을 하지 않는 방식 (기준) 방식과 주파수 중첩을 한 제

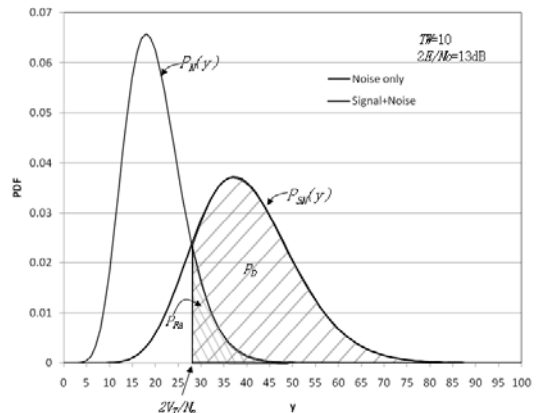


그림 10. WR 검출기의 잡음과 통신신호의 PDF (예)

안 방식간의 LPD 성능을 분석하여 그림 11과 같은 결과를 얻었다. 이때 $F_A=0.001$ 로 설정하였으며, 도약 신호를 지속적으로 관찰하여 WR 검출기가 신호대역 폭은 유추하여 전송속도의 0.5, 0.86, 1.0의 비율로 여파기 대역폭 W 를 설정하였다고 가정하였다. 그리고 T 도 상대적인 비교이어서 48심벌 주기로 하였다.

분석결과 두 방식 모두 신호가 잡음레벨과 크게 차이가 나지 않는 지역에서 검출이 가능하였으나 기존 방식이 약 1.5~2dB LPD 성능이 우수한 것으로 나타났다. 이는 제안 방식은 신호를 2배 더 송신하기 때문인 것으로 해석된다. 그러나 신호 전력에서 3dB 차이는 강우감쇄나 ACM과 같은 채널 적응 결과에 따른 차이와 구분이 불분명하므로 성능이 열화 되었다고 판정하기는 어렵다.

그러므로 LPI 분석이 보다 효과적인 성능평가 결과를 보여준다. 본 논문에서는 이러한 평가를 위해 확산 신호의 경우는 chip 속도를 검출하거나 저속도약하는 신호의 경우는 심벌속도를 검출할 수 있는 Delay and Multiply(D&M)을 사용한 LPI 성능을 비교 분석하였다.^[17,18] D&M의 구성도는 그림 12와 같아서 WR과 다른 점은 신호 주기 T 동안 지연시킨 후 원 신호와 곱하여 협대역 여파기(대역폭: W_N)을 거친 신호를 가지고 판정한다. 일정의 상관기로 이때 T 를 조정하여 최대의 상관값이 나오는 경우로 심벌 주기를 추정하는 것이다.

본 논문에서는 제안방식과 기존 방식을 비교하기 위하여 실제 신호와 잡음의 환경에서 LPI 검출기가 정확한 T 로 설정하였을 때 기존방식과 제안방식의 발

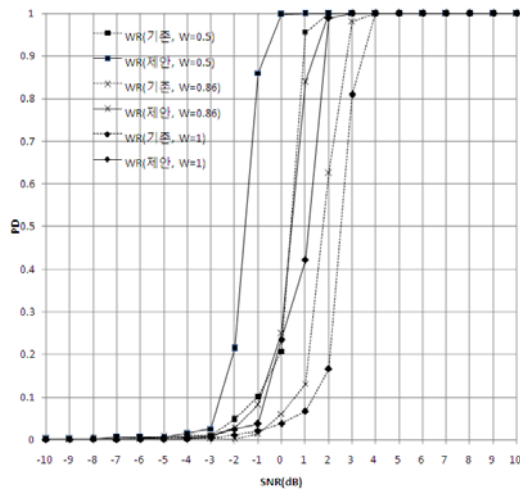


그림 11. 제안 방식의 LPD 성능

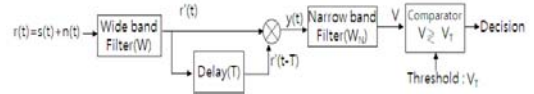


그림 12. Delay and Multiply 구성도

생된 V 값을 P_{FA} 를 가변하면서 설정된 V_T 에 따라 정확하게 신호의 전환이 일어나는 지를 추정하는 지를 분석하여 그림 13과 같이 P_D 를 구하였다. 이때 W 는 데이터 속도의 0.86을 W_N 은 W 의 10%로 설정하였다. 그리고 중첩인 경우 신호의 주파수와 지연이 완전히 일치하는 경우는 있을 수 없으므로 지터를 심벌의 25%로, 주파수 차는 심벌속도의 0.0002%로 가정하였다.

분석결과 P_{FA} 를 낮추면 낮은 신호대 잡음비로도 검출할 확률이 높아지며, WR보다는 높은 신호대 잡음비에서 데이터 속도를 검출할 수 있는 것을 알 수 있다. 제안방식은 신호대 잡음비가 11dB이상이어야 데이터 속도를 90% 이상의 확률로 검출할 수 있는 반면 기존의 방식은 약 8.5dB 이상이어야 같은 조건으로 검출이 가능하다. 즉 신호를 중첩시키면 신호에너지가 2.5dB 더 높아야 같은 확률로 전송속도를 검출할 수 있는 것이다.

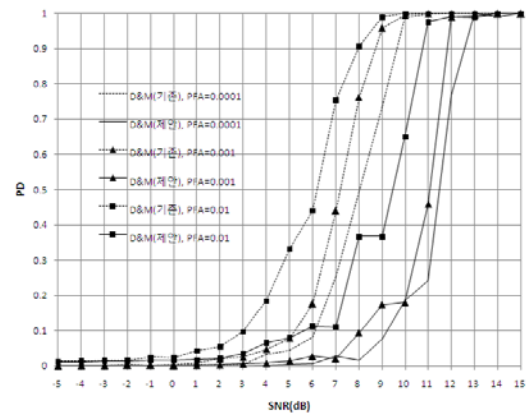


그림 13. 제안 방식의 LPI 성능

IV. 결 론

광역의 통신영역에서 예측할 수 없는 통신방해와 감청을 극복하여야 하는 군 위성통신에서는 전송효율을 높이기보다는 처리이득을 높이는 통신방식을 사용하여 왔다. 그러나 IP 기반의 다양한 전송/전략 메시지와 영상 서비스를 제공하는 네트워크의 백본 역할의 중요성이 증대되면서 위성통신에서도 광대역 전송

과 패킷 서비스에 맞는 기술개발이 요구되고 있다. 특히 송신한 신호는 수신단말 뿐만 아니라 송신단말에서도 수신될 수 있다는 위성통신의 특징을 이용하여 송수신 중첩통신기술도 개발되었다. 그러나 랜덤하게 반송파 주파수를 바꾸는 주파수 도약통신 방식에서는 적용하기가 어려웠다.

본 논문에서는 이러한 송수신 중첩통신 방식을 DSM형 중계기를 사용하는 저속 주파수 도약방식에 적용하는 것을 제안한다. 이 중계기에서는 위성을 중심으로 주파수 도약 동기를 맞추기 때문에 도약 홉내에 송수신 신호를 중첩 시킬 수 있다. 그러므로 기존의 PTP나 Hub-Spoke 방식에 적용된 중첩통신 방식이 적용될 수 있다. 이 방식을 사용하면 위성의 주파수 자원을 최대 2배까지 사용할 수 있다. 그러나 저속 주파수 도약시 재밍을 당하면 슬롯내 전체 심벌에 에러가 생길 수 있으므로 이를 극복하기 위해 남겨둔 주파수 자원을 활용하여 주파수 다이버시티를 적용하여 같은 신호를 2번 보내는 것을 제안한다.

제안한 방식에 대해 항재밍 성능과 탐지회피 성능을 분석하였다. 항재밍 분석결과 DSM형 중계기와 기존 제안 전송방식에 주파수 다이버시티를 적용하여 18.5dB의 처리이득으로 데이터 통신이 가능하며, 500MHz 도약하는 경우에는 위성단말과 같은 규모의 재머의 경우에는 전송속도를 4.8Mbps까지 전송이 가능함을 확인하였다. 또한 재머가 도약대역폭의 2%는 재밍을 해야 하므로 CW성 재밍과 비교하면 재밍 신호 발생의 어려움을 야기할 수 있음을 확인하였다. 주파수 중첩에 의해 군 위성통신에서 중요한 요소로 부가적으로 얻을 수 있는 LPI 성능은 데이터 속도를 추정할 수 있는 D&M 검출기를 대상으로 하여 중첩을 하지 않았을 때보다 2.5dB의 탐지회피 능력이 개선됨을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] M. Denkberg, "Paired carrier multiple access(PCMA) for satellite communications," in proceedings of the Pacific Telecommunications Conference, Honolulu, Hawaii, USA, 1998.
- [2] M. Ichikawa, T. Hara, M. Okada, H. Yamamoto and K. Andou, "Fast and accurate canceller on carrier superpositioning for VSAT frequency reuse," IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC), New Orleans, March 2005.
- [3] Hiroyuki Kobashi, Mayumi Osato, Takao Hara, Minoru Okada, and Heiichi Yamamoto, "Signal cancellation for satellite frequency reuse by carrier superpositioning multi-level modulation," Proceedings of IEEE Symposium on Computers and Communications(ISSCC), 2006.
- [4] S. Jayasimha and P. Jyothendar "Canceling echoes distorted by satellite transponders," National Conference on Communication, Indian Institute of Technology Delhi, Jan. 2006.
- [5] Fei He, Xiang Chen, Jian Yan, Ming Zhao, Shidong Xhou, "A low overhead pilot aided parameter estimation scheme for asymmetric PCMA systems," International ICST Conference on Communications and Networking in China, Aug. 2010
- [6] Craig Agne, Maj. Billy Cornell, Mark Dale, Ronald Kearns, and Franklin Lee, "Shared spectrum bandwidth efficient satellite communications," IEEE Military Communications Conference, San Jose, Nov. 2010.
- [7] Francesco Rossetto, "A comparison of different physical layer network coding techniques for the satellite environment," Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and Signal Processing for Space Communications Workshop, 2010.
- [8] 김기근, 임재성, "항재밍을 위한 위성데이터링크 웨이브폼 및 중계기 구조," 한국통신학회논문지, Vol. 36 No 11, 2011.
- [9] Kazuaki Murota and Kenkichi Hirade, "GMSK Modulation for Digital Mobile Radio Telephony," IEEE Trans. Commun., Vol. Com-29, No. 7, pp. 1044-1050, July 1981.
- [10] John G. Proakis and M Salehi, *Digital Communications*, Prentice Hall Inc.
- [11] Hua Xiao and Amir H. Banihashemi, "Error Rate Estimation of Low-Density Parity-Check Codes on Binary Symmetric Channels Using Cycle Enumeration," IEEE Trans. Commun., Vol. 57, No. 6, June 2009.
- [12] 김기근, 김도선, 최영균, "주파수 도약방식 위성 통신 시스템의 항재밍 성능 분석," 한국통신학회 논문지 Vol. 26 No 1, pp. 34-41, 2001.

[13] K.W Cheun, *Spread spectrum communications*, POSTECH PRESS.

[14] Robert F. Mills and Glenn E. Rescott, "A Comparison of Various Radiometer Detection Models," *IEEE TRANS. ON Aerospace and Electronic Systems* Vol. 32, No. 1, Jan. 1996.

[15] Harry Urkowitz, "Energy Detection of Unknown Deterministic Signals," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 55, No. 4, pp. 523-531, Apr. 1967.

[16] Clint R. Sikes, "Non-cooperative detection of frequency-hopped GMSK signals," Master Thesis, Air Force Institute of Technology Air Univ., 2006.

[17] D.E. Reed and M.A. Wickert, "Minimization of Detection of symbol rate spectral lines by Delay and Multiply Receivers," *IEEE Trans. Comm*, Vol. 57, No. 6, June 2009.

[18] Robert F. Mills, "Detectability models and waveform design for multiple access low-probability of intercept networks," Ph.D. dissertation. Montana State Univ. 1994.

[19] Barry K. Levitt, Unjeng Cheng, Andreas Polydoros, and Marvin K. Simon, "Optimum Detection of slow Frequency-Hopped Signals," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 42, No. 4, Apr. 1994.

[20] 김기근, 노홍준, 임재성, "Link-16 전송방식을 개선한 위성데이터링크 웨이브폼," *Telecommunications Review*, 제20권, 2호, 4월, 2010.

이민우 (MinWoo Lee)

정회원



1998년 7월~현재 해군 소령
 2008년 3월~현재 아주대학교
 NCW학과 통합과정
 <관심분야> 위성 IP network,
 위성 자원 관리

임재성 (Jae-sung Lim)

중신회원



1983년 2월 아주대학교 전자공
 학과 학사
 1985년 2월 KAIST 영상통신
 석사
 1994년 8월 KAIST 디지털통
 신 박사
 1998년 3월~현재 아주대학교
 정보통신전문대학원 교수
 2006년 8월~현재 아주대학교 국방전술네트워크 연
 구센터장
 <관심분야> 이동통신, 무선네트워크, 전술통신

김기근 (Kikeun Kim)

정회원



1992년 2월~현재 국방과학연
 구소 연구원
 2008년 3월~현재 아주대학교
 컴퓨터공학과 박사과정
 <관심분야> 위성 IP network,
 위성 데이터링크