

직접대역확산 방식의 시분할 다중접속 위성통신 제어채널 고속 부호동기 방법

정회원 류 영 재*

Fast code synchronization method of the DS-SS/TDMA control channel for satellite communication

Young-Jae Ryu* *Regular Members*

요 약

본 논문은 작전범위 내에 분포된 수백 대의 위성 단말의 상태를 제어, 감시하기 위한 DS-SS/TDMA 역방향 제어채널의 동기 구조 및 방법에 대하여 언급한다. 군용 위성은 전자전 기능 및 수백 대의 위성단말의 상태를 동시에 제어하기 위해 DS-SS/TDMA 방식의 제어채널이 필요하나 동기 시간이 긴 문제가 있다. 본 논문은 짧은 주기의 세부 Bin으로 구성된 프리앰블을 제어채널 데이터 앞부분에 삽입하고 각 세부 Bin을 병렬적으로 수신하는 정합 필터형태의 동기회로를 적용함으로써 심각한 재밍환경에서 수 ms이내에 대부분의 제어채널 패킷을 수신할 수 있는 제어채널 동기방법을 제안한다.

Key Words : Satellite Communication, Control channel, Spread Spectrum, TDMA, Code Synchronization

ABSTRACT

This paper describes synchronization concept and algorithm of the reverse DS-SS/TDMA control channel to handle satellite terminals which are distributed through the mission area. Military satellite control channel should have ECCM capabilities and handle more than several hundreds satcom terminals simultaneously. DS-SS/TDMA control channel can satisfy these demand but it spend much synchronization time. Proposed algorithm insert the preamble which is divided with several short sub bins prior to control data and use the parallel matched filtering searcher for each sub bin. As a result of the test, proposed algorithm can acquire most of control channel packet successfully within several milliseconds in severe jamming environment.

I. 서 론

2006년 8월, 한국군은 최초의 군용 통신위성인 무궁화 5호가 발사되어 정상 운용됨으로서 독자적인 위성통신망을 운용하게 되었다. 위성통신은 위성 중계기라는 공용의 채널자원의 접근이 용이하고 지형의 영향을 받지 않아 광역의 통신이 가능하고 통신망 구축이 용이한 큰 장점이 있다. 채널 자원의 접근이 용이한 위성통신의 특성은 사용자가 원하는 신호뿐만 아니라 적의 의도적인 간섭에 취약한 문제가

있으며 공용의 채널자원에 모든 단말이 자유롭게 접근이 가능하므로 중앙 집중적으로 계획된 망계획에 의해 철저히 통제되어 개별 단말에 의해 전체 망의 문제를 야기하지 않도록 제어, 감시해야 한다.

위성통신망을 관리하는 중심국은 통신영역 내에 분리 배치된 단말의 상태를 제어 및 감시하는 역할과 전체 위성의 망계획을 수립하여 개별 단말에 전파하는 역할을 수행하며 이를 위한 무선의 제어채널 구축이 필요하다. 위성단말을 제어하기 위한 제어채널은 다음의 두 가지 큰 조건을 만족해야 하는데 첫

* 국방과학연구소 (yjryu@addre.kr)

논문번호 : 논0901-04, 접수일자 : 2009년 6월 7일, 최종게재논문통보일자 : 2009년 6월 18일

제, 적의 간섭신호가 있는 경우에도 운용이 가능한 항재밍 능력을 보유해야 하며, 둘 제 통신영역 내에 분산 배치된 수백 대의 위성단말을 실시간으로 제어할 수 있어야 한다.

수백 대의 위성단말 신호를 중심국의 단일 수신기로 수신하기 위한 TDMA 수신기는 실시간 제어, 감시를 위해 빠른 동기 획득이 반드시 필요하다. 반면, 항 재밍능력 부여를 위한 대역확산 기법은 부호동기를 위한 추가시간이 필요하며 채널환경이 나쁠수록 동기 획득 시간 및 단말 제어주기의 증가로 실시간적인 제어, 감시가 불가능해지는 문제가 있다[1, 2].

본 논문은 TDMA 수신기의 빠른 동기 획득을 위한 제어채널의 프레임 구조와 수신기 알고리즘을 제안한다. 제안된 프레임 구조는 단 주기의 PN코드를 사용함으로써 빠른 동기를 획득하면서도 세부 Bin 별로 직교되는 부호를 적용하여 전송보안 능력을 유지하도록 한다. 또한, 기존 직렬탐색구조 대신 정합 필터형태의 수신기를 병렬 처리하는 구조를 채택하여 빠른 동기 획득을 가능하게 하였다. 본 논문은 II장에서 군 위성통신체계의 구성 및 제어채널 구조에 대하여 설명한다. III장에서 TDMA 수신기의 빠른 부호동기 획득을 위한 제안 프레임 구조 및 수신기 구조를 IV장에서 성능 평가결과를 제시하고 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 직렬 탐색회로의 코드 획득 성능

직접대역확산 방식에서 코드 탐색회로는 수신신호와 기준 PN 코드의 위상이 일치할 때 최대 상관값을 가지는 특성을 이용하여 PN 코드 전체 주기에서 최대의 상관값을 가지는 지점을 코드 획득지점으로 결정한다[3].

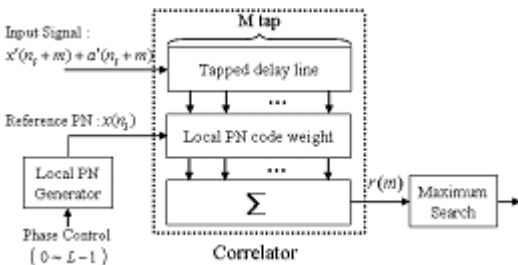


그림 1. 직렬 탐색회로(Serial Searcher)의 블록도

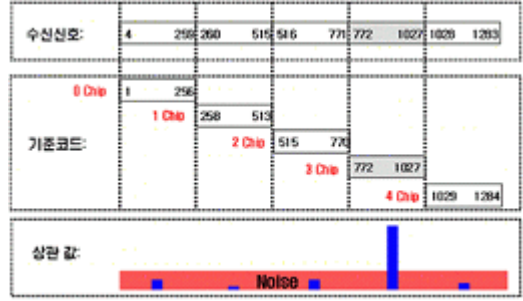


그림 2. 직렬 탐색회로(Serial Searcher)의 동작 개념

그림 1은 직접대역확산 수신기의 직렬 탐색회로(Serial Searcher)의 블록도를 나타낸다. 그림 1에서 x 는 PN 코드의 인덱스, a 는 수신 잡음, M 은 상관기의 탭 길이, m 은 기준 PN 코드와 수신 PN 코드의 위상차, $r(m)$ 은 위상차가 m 일 때의 상관값 출력을 나타낸다.

그림 2는 상관기 탭 길이가 256, 기준 PN 코드와 수신 PN 코드의 위상차가 4인 경우의 직렬 탐색회로 동작을 개념적으로 설명한 것으로 위상차가 없는 μ 이 4일 때 상관값이 최대가 된다.

PN 코드의 특성 상 코드 획득지점에서의 상관값이 미 획득지점에 비하여 월등히 크기 때문에 좋은 채널환경에서는 코드 획득오류가 발생하지 않는다. 반면 신호보다 잡음이나 재밍전력이 더 높은 채널환경에서는 잡음 등의 영향으로 미 획득 지점의 상관값이 획득 지점보다 더 커져 코드 획득오류가 발생할 수 있다.

$$r(m) = \sum_{n=1}^M x(n) \cdot \{x'(n+m) + a'(n+m)\} = \sum_{n=1}^M \{x(n) \cdot x(n+m)\} \pm N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

수식 (1)은 분산이 σ^2 인 AWGN 채널에서 코드 탐색회로의 상관값 출력을 나타내며, 위상차가 m 인 PN 코드 간 상관값과 잡음에 의한 값으로 분리할 수 있다.

$$r(m) = \begin{cases} M + N(0, M\sigma^2) & m = 0 \\ N(0, M) + N(0, M\sigma^2) & m \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

수식 (2)는 위상차에 따른 상관값의 차이를 나타

낸다. 코드 획득지점($m=0$)에서는 기준 PN 코드와 수신 신호의 부호가 동일하므로 상관값은 탭 길이와 동일한 M 이 된다. 미 획득지점($m=1 \sim L-1$)에서는 상관기 각 탭의 출력이 +1 또는 -1이 0.5의 확률로 발생하는 이항(Binomial)분포를 가지므로 M 개의 탭이 누적된 상관기의 출력은 중심극한 정리(Central Limit Theorem)에 의하여 평균이 0, 분산이 M 인 정규분포를 가진다. 수식 (2)에서 잡음에 의한 상관값은 코드 획득에 관계없이 $N(0, \sigma^2)$ 를 M 탭에 걸쳐 누적한 $N(0, M\sigma^2)$ 의 정규분포를 가진다.

$$r(m) = \begin{cases} N(1, \sigma^2/M) & m = 0 \\ N(0, (1+\sigma^2)/M) & m \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

수식 (3)은 코드 탐색회로의 상관값을 상관기 탭 길이로 정규화한 결과를 나타낸다. 코드 탐색회로는 $r(0) = \alpha$ 일 때, $m \neq 0$ 인 모든 m 에서 $r(m) < \alpha$ 인 경우에 코드를 획득할 수 있으며 모든 α 에 대해 누적하면 획득확률을 구할 수 있다.

$$P_D = \int_{-\infty}^{\infty} \{P_{(r_0=\alpha)}\}^1 \cdot \{P_{(r<\alpha)}\}^{L-1} d\alpha \quad (4)$$

수식 (4)는 코드 탐색회로의 획득확률을 나타내며, 이 때 $P_{(r_0=\alpha)}$ 는 획득지점의 상관값이 α 일 확률, $P_{(r<\alpha)}$ 는 미 획득지점의 상관값이 α 보다 작을 확률이며 수식 (5), (6)과 같다.

$$P_{(r_0=\alpha)} = \frac{\sqrt{M}}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{M(\alpha-1)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

$$P_{(r<\alpha)} = \int_{-\infty}^{\alpha} \frac{\sqrt{M}}{\sqrt{2\pi(1+\sigma^2)}} \exp\left(-\frac{Mx^2}{2(1+\sigma^2)}\right) dx \\ = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{M}}{\sqrt{1+\sigma^2}}\right) \right\} \quad (6)$$

직렬 탐색회로에서 동기획득 시간은 PN 코드 주기, 상관기의 탭 길이와 동기획득 확률에 따라 수식 (7)과 같이 결정된다.

$$T_{\text{avg}} = \left(\frac{1}{P_D} - 1\right)(MLT_c + kT_c) + MLT_c \\ = \frac{ML + k - kP_D}{P_D} T_c \quad (7)$$

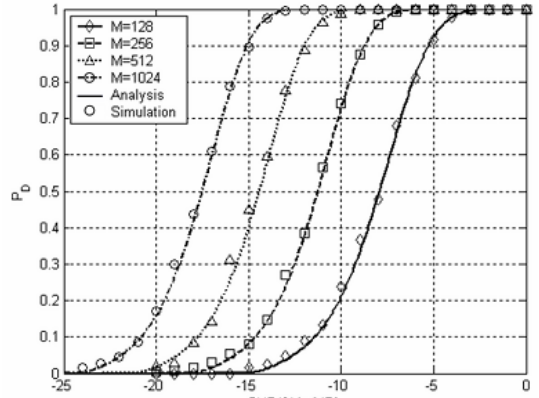


그림 3. 상관 값 측정 길이에 따른 코드획득 확률

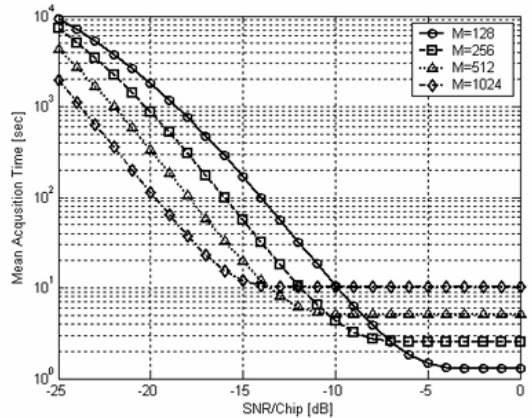


그림 4. 상관 값 측정 길이에 따른 코드획득 시간

그림 3과 그림 4는 단말국 간 1:1로 연속적인 신호를 송, 수신하는 DS-CDMA 간선 트래픽 채널의 코드획득확률과 코드획득 평균시간을 나타내며 수신 전력 대비 잡음전력이 -10 ~ -15dB인 환경에서 최소 3초에서 약 10초의 코드획득 시간이 필요하다.

위성통신체계에 적용된 DS-CDMA는 긴 주기의 코드 및 GPS 기반 없는 비 동기식 시스템으로 높은 수준의 대전자전 능력을 보유하고 GPS에 의존하는 문제를 배제하였으나 긴 코드획득 시간이 필요하여 TDMA 방식 제어채널에는 적합하지 않으며 제어채널에 맞는 제어채널 프레임 구조 및 코드탐색 회로가 필요하다.

III. DS-SS/TDMA 채널의 제안 코드획득 구조

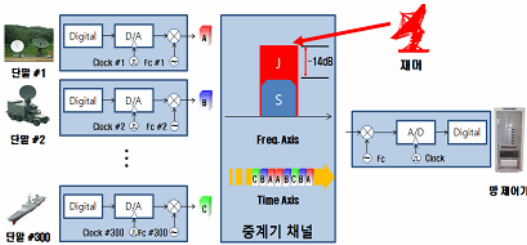


그림 5. 위성 TDMA 제어채널 개념도

그림 5는 위성통신체계에서 역방향 제어채널의 운용환경을 나타낸 것으로 각 단말에서 송신한 TDMA 패킷을 재밍이 있는 환경에서도 망 제어기의 단일 수신기로 수신하는 것을 개념적으로 나타낸 것이다. 직접대역확산 방식을 적용함으로써 신호전력보다 높은 재밍전력이 유입되더라도 수신이 가능하나 PN 코드의 획득 시간이 증가하는 문제가 있다.

신호가 연속적으로 수신되어 초기 동기획득 시간에 비교적 민감하지 않은 트래픽 채널과는 달리 수백 대의 단말을 실시간으로 제어하는 TDMA 제어채널은 1:N 패킷단위의 빠른 동기획득 시간을 요구한다.

그림 6은 단말에서 중심국으로 송신하는 역방향 TDMA 제어채널 구조를 나타낸 것이다. 전체 프레임은 세부 패킷으로 분리되어 각 단말에 할당되고 각 단말은 자신에게 할당된 패킷시간 동안 제어채널 신호를 송신한다. 제어채널 패킷은 단말상태를 주기적으로 보고하기 위한 수십 ms 이내의 짧은 데이터로 구성되므로 패킷 수신을 위한 코드 동기획득은 수 ms 이내에 완료되어야 한다.

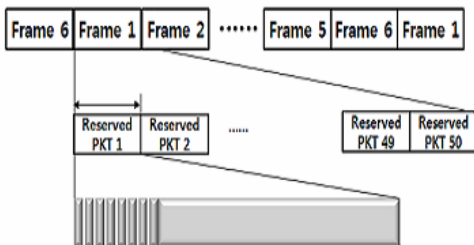


그림 6. 역방향 TDMA 제어채널 구조

수식 (7)에서 직렬 탐색회로는 코드 획득확률이 1인 이상적인 경우에도 $T_c=10\text{Mcps}$, $M=100000$, $L=100$ 으로 가정할 경우에도 1초의 획득시간이 소요되므로 수 ms 이내에 동기를 획득해야 하는 TDMA 제어채널의 코드 획득회로에는 적용할 수 없다. TDMA 제어채널의 PN 코드주기 M 을 1000으로 1/100 수준으로 줄이면 10ms 이내에 동기 획득이 가능하나 신호감청에 쉽게 노출되는 큰 문제가 발생한다.

수 ms 이내에 코드 동기 획득이 가능하고 장주기의 PN 코드를 사용할 때와 동일한 수준의 전송보안능력을 유지하기 위해 본 논문은 다음과 같은 역방향 TDMA 제어채널의 코드 획득구조를 제안한다.

TDMA 통신에서는 각 송신기의 송신 타이밍 차이로 인한 신호 충돌을 방지하기 위해 패킷 사이에 신호를 송신하지 않는 보호시간이 반드시 필요하다[4, 5]. 제안된 역방향 DS-SS/TDMA 제어채널은 이 보호시간에 코드 동기획득을 위한 프리앰블 신호를 송신한다.

그림 7은 단말국의 위치에 따른 지연에 의해 중심국에서 제어채널 패킷의 수신을 개념적으로 나타낸 것이다. 그림 7의 (a)는 동일한 단말이 연속하여 제어채널 패킷을 송신하는 것으로 각 패킷이 연속적으로 수신되며 각 패킷 간에는 충돌이 발생하지 않는다. 그림 7의 (b)는 단말 위치에 따라 위성체까지의 신호 지연의 차이에 의해 인접한 제어채널 패킷 간에 충돌이 발생하는 경우를 나타낸다.

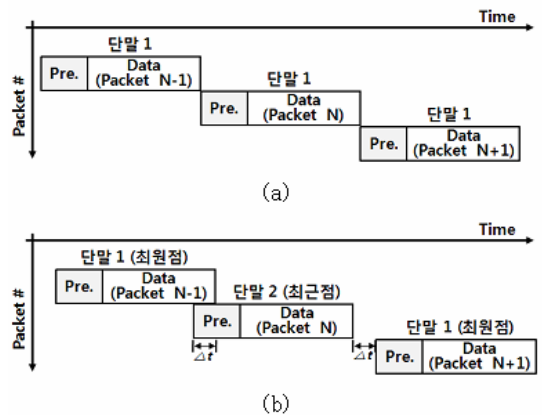


그림 7. 위성지연 차에 의한 제어채널 패킷 수신 (a) 동일 단말 연속 송신 (b) 할당된 단말 송신

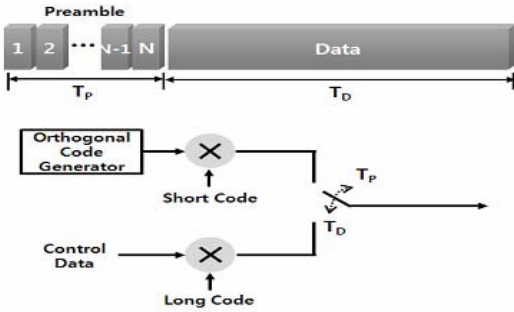


그림 8. 역방향 TDMA 제어채널 패킷구조

한반도 내에서는 최북단-위성 간 왕복 전파지연이 최남단-위성 간에 비해 약 5ms 길기 때문에 그보다 긴 프리엠블을 사용하고 프리엠블과 데이터를 상호 독립적인 PN코드로 수신하면 별도 보호시간 또는 위성-단말 간 전파시간 보정이 없이도 패킷 간 충돌을 회피할 수 있다.

데이터와 프리엠블이 별도의 생성다항식을 이용하여 코드를 생성하므로 프리엠블의 코드정보를 탐지 하더라도 이로부터 데이터의 코드정보를 추정할 수 없다.

그림 8은 단말에서 중심국으로 송신하는 역방향 TDMA 제어채널의 단일 패킷의 세부 구조를 나타낸다. 전체 프리엠블 구간을 짧은 주기의 PN 코드를 반복할 경우 프리엠블이 노출될 수 있는 문제를 해결하기 위해 전체 프리엠블 구간을 N 개의 세부 Bin으로 구분하고 각 Bin마다 독립적인 코드를 사용한다. 각 Bin의 PN 코드를 모두 알고 있는 중심국의 수신기는 T_P/N 의 코드길이에 맞추어 동기를 획득할 수 있으나 코드 정보를 알지 못하는 경우에는 T_P 의 전체 코드에 대하여 동기를 획득해야 한다.

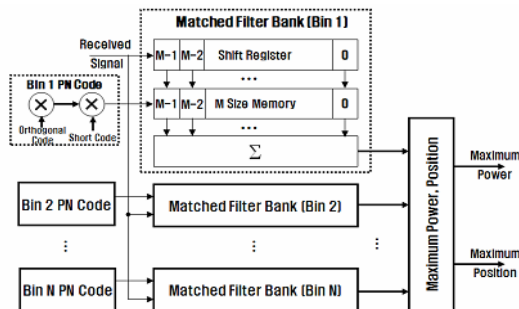


그림 9. 역방향 TDMA 제어채널 프리엠블 동기회로 구조

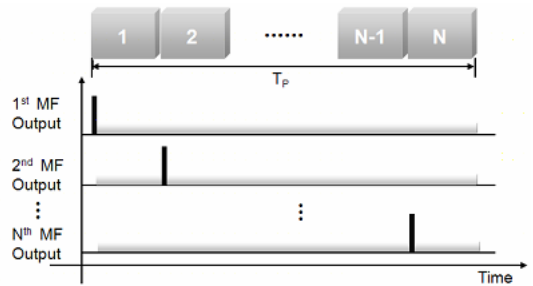


그림 10. 제어채널 정상 수신 시 각 정합필터 출력

그림 9는 본 논문에서 제안한 역방향 TDMA 제어 채널의 프리엠블을 수신하기 위한 정합필터 형태의 동기회로를 나타낸다. 상관기 길이(M)마다 수신 신호를 모아 한번 상관값을 계산하는 직렬 탐색회로와는 달리 정합필터는 각 Bin에 설정된 PN코드의 전체 주기를 저장한 상태에서 수신 PN코드를 1칩씩 이동하며 상관값을 계산한다.

그림 10은 TDMA 제어채널이 정상 수신될 때 각 Bin의 정합필터 출력을 나타낸다. 각 Bin의 정합필터는 해당 Bin에 할당된 PN코드를 탐색하여 동기가 일치할 경우 최대 상관값을 출력하므로 동기회로는 각 Bin의 최대 상관값 발생 위치로부터 제어채널 데이터의 시작 위치를 판단할 수 있다. 그림 10에서 채널환경이 우수한 경우에는 모든 Bin의 최댓값 발생지점이 정확하나 재밍과 같은 열악한 환경에서는 최댓값 발생 지점이 정확하지 않은 Bin이 발생할 수 있다.

Bin 별로 최댓값이 정상/비정상인 혼재하는 환경에서도 데이터의 정확한 위치를 찾기 위해 본 논문에서는 채널환경이 정상일 때 각 Bin의 최댓값 발생 위치 간의 칩 간격이 일정한 특징을 이용하였다. 즉, 이웃한 Bin 최댓값의 발생위치 차이가 Bin의 간격과 동일한 경우 두 Bin은 정상적으로 수신되었다고 판단하고 세 개 이상의 Bin이 연속적으로 정상일 때, 마지막으로 정상 수신된 Bin의 최댓값 위치를 기준으로 데이터의 시작위치를 판단한다.

그림 11은 프리엠블 정합필터 출력으로부터 제어 채널 데이터의 시작위치를 결정하기 위한 순서도를 나타낸다. 그림 11에서 $B.N$ 은 Bin의 번호, Valid는 이웃한 Bin 최댓값 발생위치 차이가 정상인 경우, REF_{POS} 는 최근의 가장 정상 수신된 Bin의 최댓값 발생 위치, ΔPN 은 이웃한 Bin 최댓값 발생위치 차

이, $Max(B.N)$ 은 B.N 번째 Bin의 최댓값 발생 위치, Chip 수는 한 Bin에 포함된 PN코드 칩 수를 나타낸다.

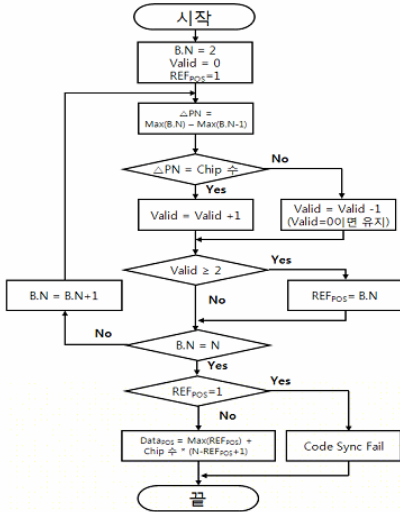


그림 11. 제어채널 데이터 시작위치 결정 순서도

그림 11과 같이 각 Bin의 최댓값 발생위치 차이를 비교하여 정상 수신된 Bin만을 제어채널 데이터 시작 위치를 판단하기 위한 기준으로 사용함으로써 열악한 환경에서 프리앰블의 일부 Bin에 오류가 발생하더라도 제어채널의 동기를 획득할 수 있다.

IV. 성능 평가

표 1은 본 논문에서 제안한 코드동기 회로의 특징 및 성능을 기존의 1:1 데이터 통신의 코드동기용 직렬 탐색회로와 비교한 것이다.

데이터 코드 주기는 기존 직렬 탐색회로와 제안 동기회로에 관계없이 동일하므로 데이터 구간의 전송보안 능력은 동일하다. 제안 동기회로는 전체 프리앰블 구간을 수천 Chip의 주기를 가지는 N개의 세부 Bin으로 나누고 수신시에 Bin의 수와 동일한 수의 정합필터 형태의 동기회로를 병렬적으로 구성하여 개별 Bin의 동기 획득 위치를 탐색하고 이를 기준으로 데이터의 시작 위치를 결정한다.

표 1. 제안 동기회로의 특징 및 성능

항목	직렬 탐색회로	제안 동기회로
데이터 코드 주기	수천 ~ 수십만 Chip	수천 ~ 수십만 Chip
프리앰블 주기	없음	수천 Chip × Bin 수
동기방식	직렬 탐색 (데이터 구간)	정합필터 탐색 + 데이터 시작 위치 결정 알고리즘
계산횟수	간단함 (상관기 길이마다 1회 계산)	복잡함 (1칩마다 1회 계산)
하드웨어 복잡도	간단함 (직렬 탐색기 1기)	복잡함 (정합필터 탐색기 N기)
동기시간	0.5초 ~ 10초 (채널환경에 가변)	10ms (채널환경에 무관)
수신성능	$S/N >_{\dots} -14dB$ 20 ~ 100% 수신	$S/N >_{\dots} -14dB$ 99% 이상 수신

직렬 탐색회로가 수백 Chip마다 한 번 상관도를 계산하는 것과는 달리 제안 동기회로는 한 Chip마다 한 번 상관도를 계산하며 Bin마다 병렬적으로 상관도를 계산하므로 직렬 탐색회로에 비하여 하드웨어가 매우 복잡하다. 제안 동기회로는 채널환경에 따라 최소 0.5초에서 10초 이상의 동기시간이 필요한 직렬 탐색회로와는 달리 채널환경에 관계없이 10ms 이내에 역방향 제어채널 패킷의 동기 획득이 가능하다.

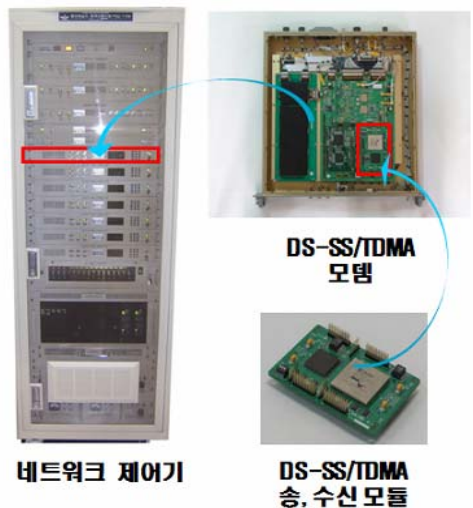


그림 11. DS-SS/TDMA 제어채널 시험 구성품

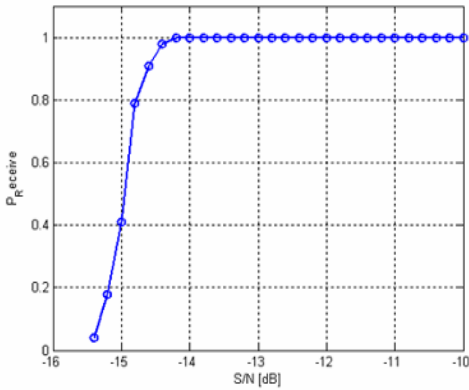


그림 12. 잡음환경에 따른 역방향 제어채널 수신율

제안된 동기회로는 그림 11의 DS-SS/TDMA 송, 수신 모듈에 구현되어 네트워크 제어기의 구성품으로 탑재되었다. 그림 12는 무궁화 5호 위성을 이용하여 제어채널 신호와 간섭 신호를 동일한 대역에 송신하고 간섭 신호의 전력을 변화하면서 신호 대 잡음비에 따른 역방향 제어채널의 수신율을 측정할 결과를 나타낸다.

제안된 동기회로는 신호 대 잡음비가 약 -14dB로 간섭신호가 25배 이상 높은 전력 환경에서도 모든 역방향 제어채널의 패킷이 수신되었다. 신호 대 잡음비가 -14dB보다 열악한 채널환경에서는 수신율이 급격히 감소하였으며 이는 일부 Bin의 최댓값 발생 위치의 오류로 인접한 Bin과의 최댓값 발생 위치 차이에 오류가 발생하여 정확한 데이터 위치를 찾지 못하기 때문이다.

V. 결 론

본 논문은 재밍환경에서도 수백 대의 단말을 중앙 집중적으로 제어, 관리하기 위한 DS-SS 기반 TDMA 역방향 제어채널의 코드 동기회로의 구조 및 동기방법을 제안한다.

TDMA 통신에 반드시 필요한 패킷 간 보호시간에 데이터 부분과 코드가 독립인 프리앰블을 삽입함으로써 프리앰블 사용으로 인한 데이터 효율 저하를 방지한다. 전체 프리앰블 주기를 서로 코드가 독립인 세부 Bin으로 나눔으로써 코드가 노출되지 않고 정합필터 방식 탐색기를 병렬로 구성하고 세부 Bin의 동기 획득 위치로부터 제어채널 데이터의 시작

위치를 탐색함으로써 데이터의 긴 PN 코드 주기에 관계없이 동기를 획득할 수 있다.

구현된 DS-SS/TDMA 송, 수신 모듈을 이용한 신호 대 잡음비에 따른 역방향 제어채널 패킷 수신율 시험에서 제안된 동기회로는 10ms 동기 시간 이내에 제어채널 패킷을 수신할 수 있으며 신호전력 대비 간섭전력이 최대 25배($S/N = -14\text{dB}$)인 채널 환경에서도 100%에 가까운 수신율을 보임을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. C. Lin, "Noncoherent Sequential PN Code Acquisition Using Sliding Correlation for Chip-Asynchronous DS/SS Communications," IEEE Trans. Commun., vol.50, no. 4, Apr 2002.
- [2] A. Polydoros, C. L. Weber, "A Unified Approach to Serial Search Spread Spectrum Code Acquisition - Part I : General Theory," IEEE Trans. Commun., vol. COM-32, no. 5, May 1984.
- [3] S. S. Rappaport, D. M. Grieco, "Spread Spectrum Signal Acquisition: Methods and Technology," IEEE Commun. Mag., vol. 22, no. 6, June 1984.
- [4] D. Falconer, F. Adachi, B. Gudmundson, "Time Division Multiple Access Methods for Wireless Personal Communications," IEEE Commun. Mag., Jan. 1995
- [5] P. Djukic, S. Valaee, "Distributed Link Scheduling for TDMA Mesh Networks," in Proc. ICC'2007, June 2007

저자

류 영 재(Young-Jae Ryu)

정희원



2000년 2월 : 경북대학교
전자공학과 졸업
2002년 2월 : 경북대학교
전자공학과 석사
2002년 2월~현재 :
국방과학연구소

<관심분야> 위성통신, 전술이동통신