한국군사과학기술학회지 제16권 제6호, pp. 819~827, 2013년 12월

학술논문 전자 · 통신 부문

주파수도약 네트워크 통신 시스템의 구조설계 및 동기성능 분석

The Design and Performance Analysis of Synchronization on Frequency Hopping Network Communication System

임 소 진* 배 석 능* 한 성 우**
So-Jin Lim Suk-Neung Bae Sung-Woo Han

ABSTRACT

Compared to legacy frequency hopping communications, future radio communications are required the secure and high data rate, ad-hoc network communication. In this paper, we have designed the network communication structure on the frequency hopping mode, and analyzed the performance of synchronization on the frequency hopping network radio systems. The design results are shown the initial sync. phase of approximately 9 hops and the traffic packet phase of approximately 30 hops. Also, we have simulated the performance on the communication conditions which are carrier bandwidth of 50kHz, user data rate of 64kbps and OQPSK modulation scheme in AWGN. In the simulation, we analyzed the correlation and the performance of synchronization success. The result of simulation show 99% probability for synchronization success at E_b/N_o -4dB.

Keywords : Frequency Hopping Spread Spectrum(주파수도약), Synchronization(동기), Correlation(상관), Network(네트워크), Packet(패킷)

1. 서 론

전술통신 환경은 음성 위주의 점대점(point-to-point) 무선통신에서 고속 데이터전송이 가능한 네트워크 통신으로 가고 있으며 이러한 추세에 발맞추어 네트워크 통신 기술이 활발히 연구되고 있다[1].

전술통신 환경은 항재밍(anti-jamming) 능력을 가지면서 네트워크 통신을 할 수 있어야 한다. 전술 환경에서 사용하는 항재밍 통신방식은 주파수도약(FHSS : Frequency Hopping Spread Spectrum) 방식으로, 오래전부터 점대점 무선통신에 널리 사용되어 왔으며, 항재밍 네트워크 통신을 위한 기법으로 사용할 수 있다. 항재밍 성능을 높이기 위해서는 랜덤성이 높은 PN (Pseudo Noise) 시퀀스를 생성하여 시퀀스 추적을 어렵게 해야 하며, 빠른 속도로 주파수를 바꿀 수 있는 고속 주파수합성기(high speed frequency synthesizer)가 있어야 한다. 주파수도약 통신시스템의 수신측에서는 고

† 2013년 8월 5일 접수~2013년 11월 15일 게재승인
* 과학기술연합대학원대학교(UST)
** 국방과학연구소(ADD)
책임저자 : 임소진(roxy_23@add.re.kr)

속으로 도약하는 랜덤 주파수를 추적하여 안정적인 통신채널을 제공하기 위해 주파수도약 동기기술이 필요하다.[2]

기존 점대점 주파수도약 통신시스템에 사용되던 주파수도약 프레임(frame) 구조는 약 1초에 해당되는 100홉의 긴 프레임 길이를 가져 네트워크 통신에 적합한 패킷 길이를 갖는 구조가 필요하다. 전술 환경에서 네트워크 통신은 패킷 교환 시 시간지연이 최소화되도록 도약 프레임의 길이를 짧게 설계할 필요성이 있다. 또한, 네트워크 통신에 적합하면서 고속 데이터전송이 이루어지려면 동기 시간이 짧아야 한다. 그러나 기존 구조는 초기동기 시간이 50홉으로 동기 획득에 소요되는 지연이 있었다.

제안하는 구조는 네트워크 통신환경에서 주파수도약 방식을 적용한 패킷 전송을 위한 주파수도약 네트워크 통신시스템의 패킷 설계에 대한 것으로 송·수신기 간의 시간지연을 최소화하도록 주파수도약 프레임을 패킷으로 설계하였다. 동기 시간을 최소화하고 재밍(jamming)에 대한 동기 성능을 유지할 수 있도록 초기동기 프레임 길이를 기존 50홉에서 9홉이 되도록 하였다. 송신기의 초기동기 프레임은 서로 다른 동기주파수 3홉을 3번 반복한 총 9홉의 길이로 초기동기 소요시간을 최소화하였으며 수신기는 4홉의 길이로 수신하여 반드시 동기가 이루어지도록 하였다. 주파수도약 프레임은 최대한 짧은 길이가 되게 하되, 오버헤드(overhead)를 줄이기 위해 초기동기 프레임의 2~3배의 길이가 되도록 설계하였다.

제안하는 구조를 설계하기 위한 조건으로 OQPSK 변조방식을 사용하고 대역폭은 50kHz로 하였으며 데이터 속도는 64kbps로 설정하였다. 또한, 제안하는 구조는 조건 및 수식을 통한 계산 결과를 바탕으로 설계되었다.

본 논문에서는 네트워크 통신에 적합한 주파수도약 프레임 구조를 설계함과 동시에 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안하는 구조의 동기성능을 분석하였다. 특히, 동기 획득 여부에 의해 시스템의 성능이 좌우되는 만큼 제안한 구조의 동기성능을 분석하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 이론적 배경에 대해 살펴보고, 3장에서는 주파수도약 네트워크 통신시스템을 모델링 하였다. 또한, 기존의 주파수도약 프레임 구조에 대해 간략히 살펴보고 그것을 바탕으로 네트워크 통신에 적합한 주파수도약 프레임 구조를 설계한다. 더 나아가 초기동기 프레임 구조를 설계하여 주파수도약 동기 절차에 대해 살펴본다. 4장에서는 AWGN 환경에서 제안한 주파수도약 네트워크 통신시스템의 동기성능을 시뮬레이션하고 그 결과에 대해 분석하며 마지막으로 본 연 구에 대한 결론 및 향후 연구 방향에 대해 제시한다.

2. 주파수도약 네트워크 통신시스템 기본이론

가. 대역확산 변조

대역확산 변조는 적대적인 환경에서 원하지 않는 수신자가 전송신호를 쉽게 검파하거나 인식하지 못하도록 통신의 보안을 유지해야하는 경우 사용하는 통신기술의 한 종류다.

대역확산 통신시스템은 기저대역에서 확산되고 전확산대역에 신호가 존재하며, 간섭에 강하다. 또한, 보안성이 높으며, 전력소모가 크고 페이딩에 강하다는 특징을 가지고 있다.

대역확산 변조는 아래의 2가지 내용으로 정의된다.

- 대역확산은 데이터를 전송하는데 필요한 최소한의 대역폭보다 많은 대역폭을 통하여 전송된다.
- 대역의 확산은 전송 전에 데이터 스트림과 PN 시퀀스를 사용함으로써 이루어질 수 있다. 같은 시퀀스가 수신기에서도 수신신호를 역확산하여 원래의 데이터 스트림을 복구할 수 있도록 사용된다.

대역확산 변조에는 직접시퀀스 확산 방식(DSSS : Direct Sequence Spread Spectrum)과 주파수도약 방식(FHSS : Frequency Hopping Spread Spectrum)이 있다. 주파수 도약 방식은 유효한 통신 대역폭을 수개의 주파수 slot으로 분할하여 전송 시간마다 그 중 어느 유효한 slot을 통하여 정보를 전송하는 방식으로 slot의 선택은 PN 시퀀스의 출력에 의하여 이루어진다.

또한, 생성된 PN 시퀀스는 고속주파수 합성기에 의해 데이터를 변조하는 반송파의 주파수를 한 주파수에서 다음 주파수로 임의로 도약하여 재머가 존재하는 대역을 회피함으로써 항재밍 능력을 갖는다. PN 시퀀스는 m개의 shift register로 만들어지며 시퀀스 생성기는 Fig. 1과 같다.

shift register 안의 플립플롭은 단일 클럭에 의해 동기가 맞추어지고 클럭의 각 펄스마다, 각 플립플롭의 상태는 라인을 따라 다음 단으로 이동되면서 PN 시퀀

스를 생성한다. 생성된 시퀀스는 주파수 합성기를 통해 서로 다른 주파수에 실어져 변조된 데이터 정보와 곱해진 후 채널로 전송된다. 수신기에서는 송신기와 같은 PN 시퀀스를 가지고 역도약을 시킨다.

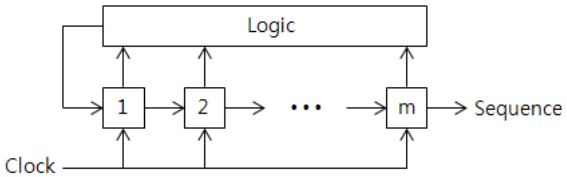


Fig. 1. PN sequence generator

대역확산 통신시스템은 수신신호를 역확산시키기 위하여 반드시 수신기에서 발생된 PN 시퀀스가 송신기에서 전송신호를 확산시키는데 사용된 PN 시퀀스와 동기가 맞아야 한다. 주파수도약 초기동기는 통신이 이뤄지는 최초에 도약하는 송신신호의 주파수도약 시퀀스에 맞게 수신기의 주파수도약 시퀀스를 조절하는 것이며, 상관동기를 통해 동기를 획득한다. 동기가 획득되면 동기정보를 확인한 후 주파수도약 동기를 획득하여 데이터정보를 복원하게 된다[3,4].

나. 네트워크 통신

네트워크란 사용자들끼리 통신을 가능하게 할 목적으로 연결해 놓은 링크, 노드의 집합을 말한다. 통신을 할 때 작은 블록의 패킷으로 데이터를 전송하며 데이터를 전송하는 동안만 네트워크 자원을 사용하도록 하며 정보 전달의 단위인 패킷은 여러 통신 지점을 연결하는 데이터 연결 상의 모든 노드들 사이에 개별적으로 경로가 제어된다.

패킷통신은 네트워크 자원을 패킷 단위로 나누어 시간을 공유하므로 어느 두 지점 간 통신 도중에 회선이 점유되는 상황이 없어져 통신 회선 사용에 대한 효율성이 높으며, 사용자의 경로선택이 가능하기 때문에, 일부의 장애가 일어나도 다른 통신 회선에서 대체할 수 있다는 특징을 가진다[5].

3. 주파수도약 네트워크 통신시스템 설계

본 장에서는 주파수도약 네트워크 통신시스템을 모델링하고 주파수 도약 프레임 구조를 설계한다. 또한, 초기동기 프레임 구조를 설계하고 주파수도약 동기 절차에 대해 살펴보고자 한다.

가. 주파수도약 네트워크 통신시스템 모델링

주파수도약 네트워크 통신시스템의 모델은 Fig. 2와 같다. 이 시스템은 송신부, 수신부로 구성되며 송신기에서는 데이터정보를 인코딩(encoding)하여 변조하고 PN코드 생성기에서 만들어진 시퀀스에 따라 고속주파수 합성기에서 불규칙한 도약주파수를 발생시키며 도약기를 통해 무선 채널로 전송된다. 수신기에서는 PN 코드 생성기와 고속 주파수 합성기에 의해 만들어진 주파수를 통해 역도약을 시키고 상관동기를 거쳐 동기정보를 획득한 후 주파수도약 동기를 얻는다[6].

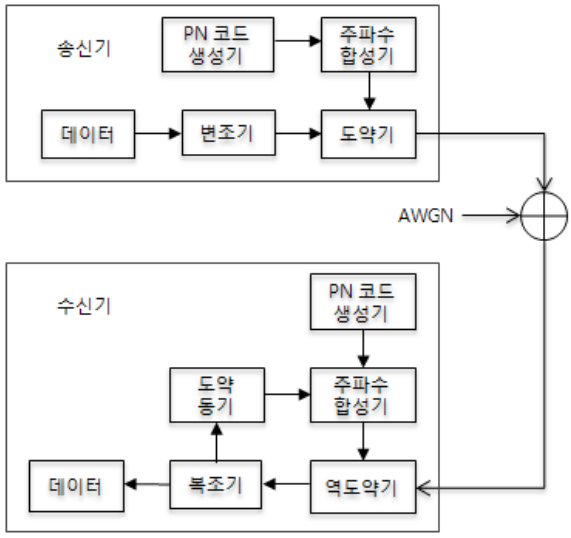


Fig. 2. System model of FH network

나. 주파수도약 프레임 구조 설계

네트워크 통신은 패킷 단위로 정보 전달을 하며 원활한 정보 전송을 위해 패킷 교환 시 시간 지연을 최소화하고 동기 획득에 소요되는 시간을 줄이기 위해 초기동기 프레임의 길이를 짧게 설계해야한다. 그래서 동기시간을 최소화하고 재밍에 대한 동기성능을 유지할 수 있도록 초기동기 프레임 길이를 기존 50홉에서 9홉이 되도록 하였다. 송신기의 초기동기 프레임은 서로 다른 동기주파수 3홉을 3번 반복한 총 9홉이며 수신기는 4홉의 길이로 수신하는 구조로 반드시 동기가 이루어지는 최소의 길이가 되도록 설계하고자 한다. 주파수도약 프레임은 시간지연이 발생하지 않도록 최대한 짧은 길이가 되게 하되, 오버헤드를 줄

이기 위해 초기동기 프레임의 2~3배의 길이가 되도록 Table 2의 수식을 통해 적절한 길이가 되도록 도출하고자 한다.

여기에서는 기존 주파수도약 프레임 구조 및 구성요소에 대해 살펴보고 네트워크 통신에 적합한 주파수도약 프레임 구조에 대해 설계한다.

1) 기존 주파수도약 프레임 구조 및 구성요소

기존 점대점 통신환경에서 사용하는 주파수도약 프레임 구조는 Fig. 3과 같다. Fig. 3은 초기동기를 획득한 후 데이터를 전송하는 주파수도약 프레임의 구조로, 약 1초 동안 100홉이 전송되며 서로 다른 주파수로 도약을 하므로 홉과 홉 사이에는 주파수 변환에 소요되는 시간인 뮤트(mute)가 존재한다. 동기홉은 주파수도약을 하는 송신기와 수신기의 도약 시퀀스를 맞추기 위한 것이다[2,6].

또한, 데이터 속도는 16kbps이고, 주파수도약을 할 시엔 뮤트를 고려하여 데이터 속도보다 높은 속도로 전송된다. 사용하는 주파수 대역은 VHF이며, 한 홉의 대역폭은 25kHz이고, 변조방식은 BPSK이다[2].

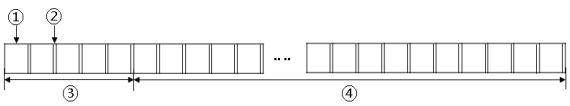


Fig. 3. Conventional FH frame structure

여기서 ①은 데이터이며 ②는 뮤트, ③은 동기홉이며 ④는 데이터홉을 의미한다.

2) 제안하는 주파수도약 네트워크 프레임 구조

가) 설계 조건

여기에서는 네트워크 통신에 적합한 주파수도약 프레임의 패킷 구조를 도출하기 위한 설계조건을 제시한다. 제안하는 주파수도약 네트워크 프레임 설계 조건은 Table 1과 같다. 대역폭은 50kHz이며, 정보속도는 64kbps, 변조 방식은 OQPSK이다. 특히, OQPSK는 Q채널을 통한 bit data stream과 I채널을 통한 bit data stream에 한 bit구간만큼 시간차를 두어 엇갈리게 함으로써 두 bit의 값이 동시에 바뀌어 발생하는 180°의 위상변화를 막는 방법이다[7]. 이 방식은 QPSK에 비해 포락선 변동이 완만하여 back off를 최소화할 수 있으므로 전력이 제한되어 있는 전술 환경에 전력의 효율성을 높여주는 효과를 얻을 수 있다.

Table 1. Physical layer requirements

구 분	조건
대역폭	50kHz
정보속도	64kbps
변조방식	OQPSK

나) 주파수도약 네트워크 프레임 구조 계산

주파수도약 네트워크 프레임 구조를 설계하기 위해 필요한 구성요소와 조건 및 결과값은 Table 2에 제시한다.

구성요소는 다음과 같이 표기한다. P_{AGC}는 AGC프리앰블, N_h는 도약홉수, N_s는 동기홉수, N_d는 정보홉수, C는 패킷길이, $L_{d_{total}}$는 정보 총 길이, L_h는 도약홉 길이, L_d는 정보길이, M은 뮤트길이, V_{fh}는 도약속도를 의미하며, V_d는 정보속도로 위의 설계조건에 제시하였다.

Table 2. FH packet calculation

구성요소	조건	결과값
P_{AGC}	4~8bits	4bits
N_h	20~40홉	30홉
N_s	1~3홉	3홉
L_d	640~688bits	672bits
M	80~90bits	80bits
N_d	N_h-N_s	27홉
C	$L_h \cdot N_h$	22680bits
$L_{d_{total}}$	$L_d \cdot N_d$	18144bits
L_h	L_d+M+P_{AGC}	756bits
V_{fh}	$(V_d \cdot C)/L_{d_{total}}$	80kbps

여기서 AGC 프리앰블 4bits는 현재 전술 다대역 다기능 무전기에서 할당된 값을 적용하였다[8]. 패킷 교환시 시간지연이 발생하지 않도록 최대한 짧은 길이가 되게 하되, 오버헤드를 줄이기 위해 초기동기 프레임의 2~3배의 길이가 되도록 설정하여 전체 홉 수(N_h)가 30홉으로 산출되었다. 또한 동기홉(N_s) 3홉은 재밍이 들어와서 동기주파수가 50% 이상 간섭을 받

아도 정보 복원이 가능한 최소한의 길이가 되도록 하였다. 패킷길이(C)는 한 패킷 내의 총 비트수이며, 정보 총 길이($L_{d_{total}}$)는 AGC프리앰블, 뮤트, 동기홉의 길이를 제외한 패킷 내의 정보 길이를 의미한다. 또한, 정보길이와 뮤트는 전송속도 증가에 해당되는 범위로 설정하였고, 도약홉 길이(L_h)는 한 홉의 길이이며, 도약속도(V_{fh})는 무선 채널에서의 속도를 의미한다.

다) 주파수도약 네트워크 프레임 구조

주파수도약 네트워크 프레임 구조는 Fig. 4와 같다. 앞에서 제시한 설계조건과 구조 계산에 사용된 수식을 바탕으로 한 패킷의 전체 홉 수가 30홉이 되도록 설계하였다. 전체 30홉 중 정보홉은 27홉으로 데이터 정보가 포함되며, 3홉은 주파수도약을 하는 송신기와 수신기의 도약 시퀀스를 맞추기 위한 동기홉이다. AGC 프리앰블은 4bits로 데이터 정보를 전송하기 전에 전송 타이밍을 동기화하기 위한 요소이며, 뮤트는 80bits로 주파수 변환에 소요되는 시간이다.

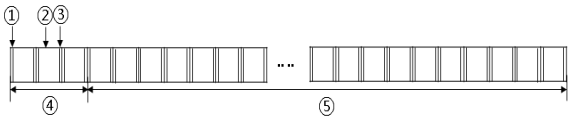


Fig. 4. Proposed FH frame structure

여기서 ①은 AGC프리앰블이며 ②는 정보, ③은 뮤트, ④동기홉이고 ⑤는 정보홉을 의미한다.

다. 초기동기 프레임 구조 설계

여기에서는 주파수도약 네트워크 통신시스템의 초기동기 프레임 구조와 1홉에 대한 세부구조를 설계한다. 또한, 설계한 구조의 주파수도약 동기절차에 대해 설명한다.

1) 초기동기 프레임 구조

초기동기 프레임은 동기 시간을 최소화하고 재밍에 대한 동기 성능을 유지할 수 있도록 프레임 길이를 기존 50홉에서 9홉이 되도록 한다. 송신기의 초기동기 프레임은 서로 다른 동기주파수 3홉을 3번 반복한 총 9홉이며 수신기는 4홉의 길이로 수신하는 구조로 반드시 동기가 이루어지는 최소의 길이가 되도록 설계하였다.

제안하는 주파수도약 네트워크 프레임의 초기동기 구조는 Fig. 5와 같다. 송신부에서는 N_{sync}개의 동기주파수를 P_c번 반복하여 전송하게 되므로, 송신기의 초기동기 지속시간 T_{tx}는 식 (1)과 같다. 단, T_h는 한 홉의 지속시간을 말한다.

$$\text{송신기 초기동기 시간} \quad T_{tx} = N_{sync} \cdot P_c \cdot T_h \tag{1}$$

수신부에서는 동기주파수 일치확률을 높이기 위해 수신기의 1홉 지속시간(T_{rx})을 송신기의 동기주파수 한 주기 지속시간 $N_{sync} \cdot T_h$보다 한 홉 더 긴 시간만큼 수신대기 한다. 수신기의 한 홉 지속시간은 식 (2)와 같다.

$$\text{수신기 1홉 지속시간} \quad T_{rx} = (N_{sync}+1) \cdot T_h \tag{2}$$

수신 주파수의 지속시간이 초기동기 한 주기 시간보다 한 홉 길게 되므로 Fig. 5에서처럼 임의의 송신주파수 $f_{i+(N_{sync}-1)}$가 수신 주파수 $f_{i+(N_{sync}-1)}$와 한 주기에서 반드시 한 번 일치하게 된다.

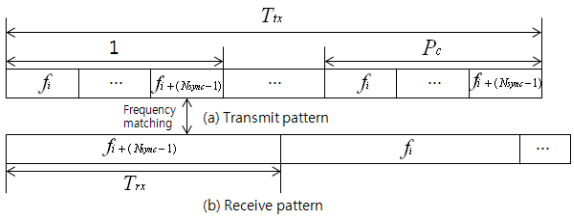


Fig. 5. Frequency patterns for FH synchronization

2) 초기동기 1홉 구조

초기동기의 한 홉의 구조는 Fig. 6과 같다. 한 홉은 AGC(Automatic Gain Controller)Word 32symbol, CorrWord 84symbol, SyncInfoWord 220symbol로 구성된다. 먼저, AGCWord는 자동 이득 조절기로 수신된 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환할 때, 수신신호를 일정한 전력레벨로 맞춰주는 역할을 한다. 또한, CorrWord는 수신기에 수신된 신호와 약속된 신호를 correlation한다. 상관결과가 상관임계값 이상이면 동기정보(SyncInfoWord)가 획득되며, 수신기에서는 동기정보를 통해 송신기와 수신기의 주파수를 일치시킬 수 있게 된다. 동기정보(SyncInfoWord)에는 동기 홉 순서, 시간정보, 수신 주소 등 도약 및 네트워크 동기 정보가 포함되어 있다.

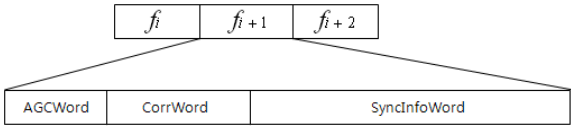


Fig. 6. Frame structure of a hop

3) 주파수도약 동기 절차

주파수도약 동기방식은 송신기와 수신기가 약속된 패턴으로 도약 동기주파수를 송신하고 수신기는 송신기에 맞추어 도약 동기주파수를 찾고 송신 주파수 패턴에 맞추어 정보를 수신하는 과정이다.

수신기에서 주파수도약 동기가 가능할 수 있도록 송신기에서는 Fig. 6과 같이 초기동기 프레임 3개의 홉을 AGCWord+CorrWord+SyncInfoWord 형태로 구성한다. 이때, 3개의 홉에는 서로 다른 동기홉 순서, 시간정보 등이 포함된다. 이렇게 형성된 초기동기 프레임은 먼저 OQPSK 변조가 이루어진 뒤, 랜덤한 동기주파수 f_i, f_{i+1}, f_{i+2}에 의해 도약이 이루어져 전송되게 된다. 송신기의 랜덤 동기주파수 f_i, f_{i+1}, f_{i+2}는 전체 동기주파수 set 식 (3)에서 송신기의 시간 t_{tx}를 변수로 하여 선택되어지며, 식 (4)와 같다. 수신동기 주파수는 수신기의 시간 t_{rx}를 변수로 하여 생성되며 생성되는 수신동기 주파수는 식 (5)와 같다. 만약, 송수신기의 시간차이가 t_δ초 이내라면 i = j가 되어 송수신기의 동기주파수는 같게 된다. 이번 연구의 초기동기 성능분석을 위한 시뮬레이션에서는 송신기와 수신기 사이의 시간차이를 t_δ초 이내로 가정한다[9].

주파수 set $$F = \{f_0, f_1, \cdots, f_{N-1}\} \quad (3)$$

송신동기 주파수 $$F_{tx}^{sync} = \{f_i, f_{i+1}, f_{i+2}\} \quad (4)$$

수신동기 주파수 $$F_{rx}^{sync} = \{f_j, f_{j+1}, f_{j+2}\} \quad (5)$$

(단, i, j는 $0 \le i, j \le$ N-3 인 정수)

수신기에서 도약동기를 위해 이루어지는 절차는 다음과 같다. 먼저 송신기와 수신기 사이의 시간 차이가 t_δ초 이내라고 가정하였으므로, 수신기의 동기주파수는 송신기의 동기주파수와 같은 f_i, f_{i+1}, f_{i+2}가 된다. N_{sync} = 3인 동기주파수를 사용하여 $(N_{sync}+1) \cdot T_h$ = $4T_h$시간마다 주파수를 바꿔가며 수신대기하고 있는 수신기에 송신기가 전송한 신호가 들어오게 되면 주파수도약 동기 절차가 이루어진다. f_i, f_{i+1}, f_{i+2}중 어느 하나의 주파수에 송신주파수가 일치되면 가장 먼저 AGC를 통한 이득조절이 이루어진다. 이러한 이득조절을 통해 상관동기 성능 및 동기정보 복조 성능을 높일 수 있다. 이득조절이 이루어지고 나면 동기정보 획득을 위한 상관연산이 이루어지며 상관연산을 위한 수식은 식 (6)과 같다.

$$R_x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} r^*(k)x(n+k) \quad (6)$$

단, $r^*(k)$는 $r(k)$의 complex conjugate를 의미한다.

수신되는 신호 $x(n)$과 길이 N인 참조프레임 $r(n)$에 대하여 상관이 이루어지고 그 결과 $R_x(n)$이 상관임계값 α를 넘게 되는 시점 $\hat{\tau}$을 최적의 동기정보 획득 타이밍으로 판단한다. 추정한 동기정보 획득 타이밍 $\hat{\tau}$에 대한 성능은 검출(detection) 확률 및 오검출(false alarm) 확률로 알아보게 되며, 각각에 대한 설명은 아래 식과 같다. 단, τ는 실제 동기정보 획득 타이밍이다[10].

- detection : $R_x(n) > \alpha$ 일 때
- false alarm : $\hat{\tau} \neq \tau$ 일 때

동기정보 획득절차에서는 송신기에서 전송한 동기홉 순서, 시간정보를 사용하여 송신기의 주파수도약 타이밍 및 동기주파수 발생 순서를 추정한다.

$\hat{\tau}$을 추정함에 있어 오검출 확률이 있으므로 추정된 주파수도약 동기의 정확성 보장을 위해서는 추가적인 동기확인 과정이 필수적이다. 이러한 동기확인 과정을 동기추적 과정이라고 하며, 동기추적 과정은 상관 결과 값이 상관임계값 α를 연속해서 넘는지 확인해야 하며, 중간에 상관결과가 α를 넘지 않는 경우가 발생하면 오검출로 판단하게 된다. 또한, 수신된 동기정보와 이전 홉에서 수신된 시간정보 연속성이 없을 경우에는 오검출로 판단하고 새롭게 주파수도약 동기과정을 시작하게 된다.

이번 시뮬레이션에서는 3홉을 동기추적하여 수신된 시간정보 연속성이 있다고 판단되면 최종 주파수도약 동기획득에 성공한 것으로 판단하였다.

4. 동기성능 시뮬레이션 결과 및 분석

4장에서는 설계한 주파수도약 네트워크 프레임 구조의 동기성능 분석을 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고 결과를 분석하였다. 시뮬레이션을 위해서 한 홉의 지속시간 T_h는 10msec로 정하고, 동기주파수의 수 N_{sync} = 3, 송신동기 주기 P_c = 3으로 설정한다.

패킷은 한 홉은 336 symbols이며, 세부 구성은 AGCWord는 32 symbols, CorrWord는 84 symbols, SyncInfoWord는 220 symbols로 이루어져있다. 상관동기가 획득되는 CorrWord가 84 symbols로 상관동기 판정을 위한 상관임계값 α를 약 50, 60, 67 symbols로 설정하고 이를 비율로 환산하면 상관비율은 약 0.6, 0.7, 0.8의 3가지 경우가 된다.

상관동기 성능은 타이밍 추정값 $\hat{\tau}$의 검출(detection) 확률과 오검출(false alarm) 확률에 대해 시뮬레이션을 수행하고 결과를 분석하였다. 또한, 시뮬레이션에는 AGCWord를 통한 이득조절은 포함되지 않았다.

주파수도약 동기성능을 분석하기 위한 시뮬레이션의 동기획득 과정은 Fig. 7과 같은 상태도로 나타낼 수 있다. 먼저 수신대기(Standby) 상태에서는 계속해서 상관연산(Correlation)이 이루어진다. 상관연산 결과가 α 값 이상이 되면 동기추적(Tracking) 상태로 이동한다. 동기추적 상태에서는 시간정보 연속성(Sync_confirm)을 3홉 연속으로 측정하여 시간정보 연속성이 획득되면(Sync_confirm = 3) 동기획득에 성공(SyncSuccess)한 상태가 된다. 만약 시간정보 연속성을 찾지 못하면(Sync_confirm < 3) 다시 수신대기(Standby) 상태로 이동되어 상관연산을 수행하게 된다. $9T_h$이내에 동기획득이 되지 않으면 주파수도약 동기는 실패가 된다.

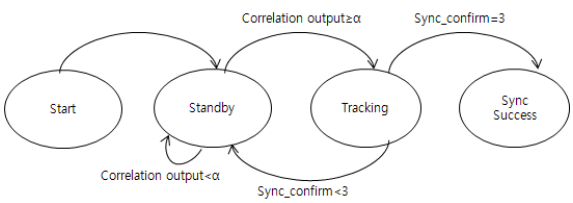
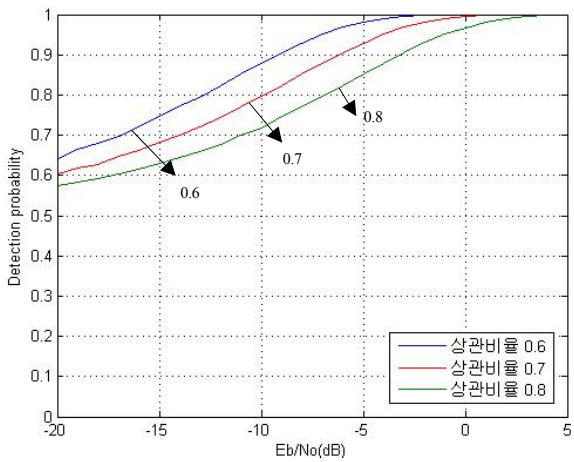


Fig. 7. State transition diagram

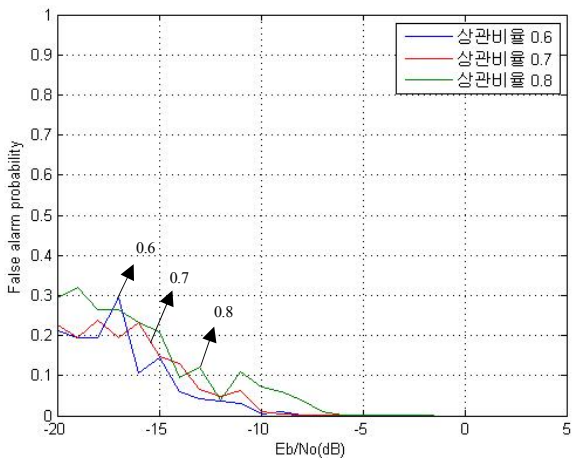
가. 상관동기 성능

주파수도약 시스템에서 초기동기 획득을 위해서 먼저 동기정보 획득이 필요하다. 동기정보 획득을 위해서는 초기동기 프레임에 삽입된 CorrWord를 통해 정확한 타이밍에 동기정보 획득을 해야 한다. 따라서 이번 시뮬레이션에서는 앞장에서 설명한 것과 같이 타이밍 추정값 $\hat{\tau}$의 검출(detection) 확률과 오검출(false alarm) 확률을 보기로 한다.

상관동기 성능을 확인하기 위한 시뮬레이션을 수행하여 Fig. 8과 같은 결과를 얻었다. E_b/N_o의 범위를 -20dB에서 5dB까지 설정하고, 상관비율이 각각 0.6, 0.7, 0.8일 때 검출과 오검출 확률을 분석하였다.



(a) Detection probability



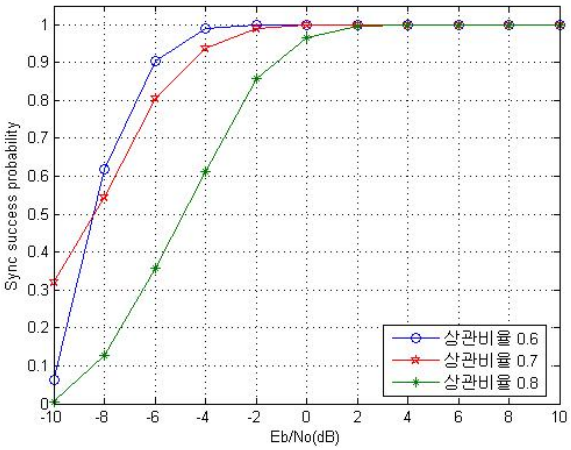
(b) False alarm probability

Fig. 8. Performance of correlation synchronization

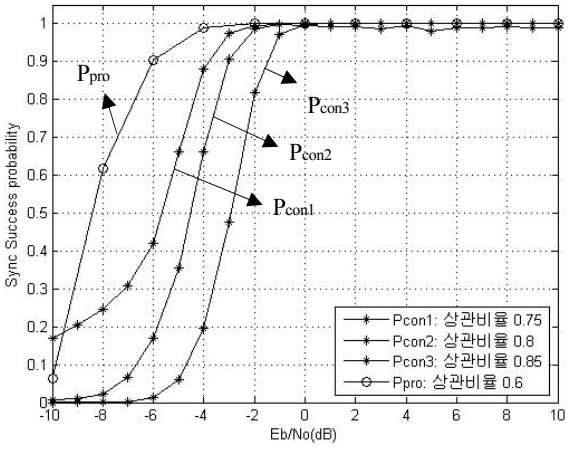
Fig. 8(a)는 E_b/N_o에 따른 타이밍 추정값 $\hat{\tau}$의 검출(detection) 확률로써, -5dB에서 상관비율에 따른 결과를 비교해보면 상관비율이 0.6일 때 약 99%의 검출 확률

을 얻었으며, 0.7일 때는 약 93%의 검출 확률을 얻었다. 또한, 0.8일 때는 약 80%의 검출 확률을 얻었다. Fig. 8(b)는 E_b/N_o에 따른 타이밍 추정값 $\hat{\tau}$의 오검출(false alarm) 확률로써, -5dB에서 모든 상관비율이 약 0.02% 이하의 유사한 오검출 확률을 가짐을 확인할 수 있었다.

결과적으로 최적의 상관동기 성능은 오검출 확률을 -5dB에서 비교했을 때 그 결과가 모두 0.02% 이하이고 오검출 확률이 유사하다면, 검출 확률이 가장 높은 것을 선택해야 상관동기 성능을 높일 수 있으므로 상관비율이 0.6일 때 최적의 상관동기 성능을 가짐을 확인하였다.



(a) Proposed synchronization success probability



(b) Comparison of FH synchronization success probability

Fig. 9. Probability of synchronization success

나. 동기성공 확률

상관동기 성능 분석을 통해 상관동기를 획득한 후 전체적인 주파수도약 동기성능에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. E_b/N_o를 -10dB에서 10dB까지 설정하여 전체 주파수도약 동기성공 확률을 분석하였다.

Fig. 9의 (a)는 제안하는 구조의 E_b/N_o에 따른 동기성공 확률을 시뮬레이션 한 결과이다. 상관비율이 0.6일 때 최적의 동기성능을 가지며 -4dB에서 약 99% 이상의 동기성공 확률을 가짐을 확인할 수 있다. Fig. 9의 (b)는 기존 주파수도약 프레임과 제안한 구조에서 최적의 동기성능(상관비율 0.6)의 동기성공 확률을 비교한 것이다. 여기서 Pcon1, Pcon2, Pcon3은 기존 프레임의 동기성공 확률을 나타내며 Ppro는 제안한 구조가 최적의 동기성능(상관비율 0.6)을 가질 때 동기성공 확률이다. Ppro와 Pcon1, Pcon2, Pcon3을 비교해보면 -9dB이상에서 제안한 구조가 각 E_b/N_o 값에서 기존보다 높은 성능을 나타냄을 확인할 수 있다.

결과적으로 상관비율이 0.6일 때 최적의 상관동기 성능을 가지며 제안한 구조가 -9dB이상의 각 E_b/N_o 값에서 기존보다 높은 성능을 나타냄을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 네트워크 환경에 적합하면서 고속 데이터 전송이 가능한 주파수도약 네트워크 통신 시스템을 모델링하고 초기동기와 주파수도약 프레임 구조를 설계하였다. 설계조건은 변조방식은 OQPSK, 대역폭을 50kHz, 정보속도는 64kbps로 설정하고 제안하는 구조를 설계하기 위해 필요한 수식도 도출하였다.

동기 시간을 최소화하고 재밍에 대한 동기 성능을 유지하도록 초기동기 프레임 길이를 기존 50홉에서 9홉으로 설계하였다. 송신기의 초기동기 프레임은 서로 다른 동기주파수 3홉을 3번 반복한 총 9홉이며 수신기는 4홉길이로 수신하는 구조로 반드시 동기가 이루어지는 최소의 길이가 되도록 하였다. 주파수도약 프레임은 시간지연이 발생하지 않도록 최대한 짧은 길이가 되게 하되, 오버헤드를 줄이기 위해 초기동기 프레임의 2~3배의 길이를 갖도록 30홉으로 설계하였다.

동기성능 분석은 E_b/N_o에 따른 상관동기 성능과 동기 성공 확률에 대해 수행하였다. 상관동기 성능을 분석하여 최적의 동기성능(상관비율 0.6)을 구하였고, 동기성공 확률에 대한 시뮬레이션을 수행하여 최적의 동

기성능을 가질 때, -4dB에서 약 99% 이상의 동기성공 확률을 가짐을 확인할 수 있었다. 또한, 기존의 동기성공 확률과 비교하여 -9dB 이상의 각 E_b/N_o에서 기존보다 더 높은 동기성능을 가짐을 확인 할 수 있었다.

본 논문에서는 네트워크 통신에 적합하면서 고속 데이터전송이 가능한 초기동기와 주파수도약 프레임 구조를 설계하고 시뮬레이션을 통해 구조의 적합성을 확인하였다. 또한, 연구결과는 향후 실제 주파수도약 네트워크 통신 시스템의 구현에 적용하여 시스템 설계 및 성능 측정에 기여할 것으로 기대한다.

References

[1] 홍진기, "미래 전장관리정보체계 구축 방향", 국방정책연구 제64호, pp. 127～146, 2004.

[2] 한성우, 주파수도약 통신에서 적응동기 및 데이터 전송 보고서, CED-517-990512, 국방과학연구소 보고서, 1999.

[3] John G. Proakis, "Digital Communications, 5th Edition", Publishing House of Electronics Industry, pp. 719～753, 2009.

[4] Simon Haykin, "Communication Systems, 3th Edition", John Wiley & Sons, Inc, pp. 469～478, 1995.

[5] James F. Kurose, Keith W. ROSS, "Computer Networking, 6th Edition", Pearson, pp. 9～67, 2012.

[6] 배석능 외 1명, "주파수도약 무선통신 시스템의 동기 성능", 한국통신학회논문지, Vol. 36, No. 4, 2011.

[7] 양영원 외 8명, "디지털통신과 MATLAB/SIMULINK", 홍릉과학출판사, p. 224, 2005.

[8] 한성우, 전술 다대역 다기능 무전기 상세설계보고서, 국방과학연구소 보고서, 2012.

[9] Gennian Ge, Ying Miao and Zhongxiang Yao, "Optimal Frequency Hopping Sequences : Auto-and Cross-Correlation Properties", IEEE Transaction on Communications Theory, Vol. 55, No. 2, February 2009.

[10] Rodger E. Ziemer, William H.Tranter, "Principles of Communications, 5th Edition", John Wiley & Sons, Inc, pp. 467～469, 2002.