

AeroMACS 시스템을 위한 동기화기 설계

Design and Implementation of Synchronization Unit for AeroMACS System

장수현¹ · 이은상² · 정윤호¹

¹한국항공대학교 항공전자 및 정보통신 공학부

²현대자동차

Soohyun Jang¹ · Eunsang Lee² · Yunho Jung^{1*}

¹School of Electronics, Telecommunication and Computer Eng., Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 412-791, Korea

²Hyundai Motor Group, Gyeonggi-do 445-706, Korea

[요 약]

본 논문에서는 항공관제통신용 AeroMACS 시스템을 위한 시간/주파수 동기 획득 및 기지국 셀탐색 알고리즘을 분석하고, AeroMACS 채널 모델에서 동기 알고리즘의 성능 평가를 진행하였다, 그리고, 상기 알고리즘을 이용한 AeroMACS 시스템용 동기화기를 설계 및 구현하였다. AeroMACS 시스템은 IEEE 802.16e mobile WiMAX 규격에 기반 된 시스템이나, WiMAX 시스템과 달리 5GHz 항공 주파수 대역에서 5MHz의 대역폭을 활용하여 통신을 수행한다. 변경된 사양에 따른 시스템 모델링 후에 apron (APR), runway (RWY), taxiway (TWY), park (PRK) 등 다양한 공항 환경에 대한 채널 모델에 기반하여 시간 및 주파수 동기 알고리즘 및 셀 탐색 알고리즘의 성능 평가를 수행하였다. 그리고, 이를 FPGA 기반 실시간 구현 및 검증하였다.

[Abstract]

In this paper, the performance analysis results of time/frequency synchronization and cell search algorithm are presented for aeronautical mobile airport communication systems (AeroMACS). AeroMACS is based on IEEE 802.16e mobile WiMAX standard and uses the aeronautical frequency band of 5GHz with the bandwidth of 5MHz. The simulation model of AeroMACS is designed and the performance evaluation is conducted with the various airport channel models such as apron (APR), runway (RWY), taxiway (TWY), and park (PRK). The proposed synchronization unit was designed in hardware description language (HDL) and implemented on FPGA. Also, the real-time operation was verified and evaluated using FPGA test system.

Key word : AeroMACS, IEEE 802.16e Mobile WiMAX, Timing Synchronization.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2014.18.2.142>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 11 March 2014; Revised 25 April 2014
Accepted (Publication) 29 March 2014(30 April 2014)

*Corresponding Author; Yunho Jung

Tel: +82-2-300-0133

E-mail: yjung@kau.ac.kr

I. 서론

최근 항공통신 시스템은 항공 산업의 지속적인 성장과 항공기에서 요구되는 데이터 트래픽의 증가로 인해 높은 데이터 전송률과 안정적인 성능을 보장하는 고속 광대역 통신 시스템으로 변경이 요구되고 있다. 이에 RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics) 프로그램 관리 위원회는 2009년 C-Band 대역에서 IEEE 802.16e Mobile WiMAX (worldwide interoperability for microwave access) 규격에 기반한 새로운 항공통신용 시스템 규격을 제안하였고, 제안된 시스템은 AeroMACS (aeronautical mobile airport communications System)로 명명되었다 [1]-[3].

AeroMACS 시스템은 WiMAX 규격에 기반 된 시스템으로 WiMAX 시스템과 동일한 동기화 과정을 수행한다. 즉, 시간 동기, 주파수 동기, 셀 탐색 과정이 동기 단에서 수행된다. 하지만 WiMAX 시스템과 달리 주파수 전송 대역이 5 GHz 항공 주파수 대역으로 정의되고, 주파수 대역폭은 5 MHz로 변경되었을 뿐만 아니라, 공항이라는 특수한 채널 환경에서 운용된다. 이에 따라 본 논문에서는 WiMAX 시스템의 시간, 주파수 동기 및 셀 탐색 알고리즘을 AeroMACS 시스템에 적용하여 성능을 분석하고, 이를 하드웨어로 구현하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 항공통신용 AeroMACS 시스템과 프리앰블 구조를 설명하고, III장에서 AeroMACS 시스템을 위한 동기 알고리즘을 소개와 함께 시물레이션을 통한 동기 성능 분석결과를 제시한다. IV장에서는 동기 단의 하드웨어 구현 결과를 제시하고, V장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

2-1 AeroMACS 시스템 사양

표 1. 항공관제통신용 AeroMACS 시스템 사양
Table. 1. AeroMACS specifications.

System Profile	Key Parameter
Frequency Band	5000 ~ 5150 MHz
Channel Bandwidth	5 MHz
Duplexing Mode	TDD
Mobility	Max. 50 Knots (92.6 km/h)
Modulation	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
MIMO Support	STC
FEC	Conv. Code, Turbo Code, HARQ
FFT-point (N)	N = 512

AeroMACS 시스템의 주파수 대역은 5 GHz, 주파수 대역폭은 5 MHz를 사용하고 시스템은 공항 내에서 운용된다. 표 1은 AeroMACS 시스템 파라미터를 정리한 표이다 [1].

2-2 프리앰블 구조

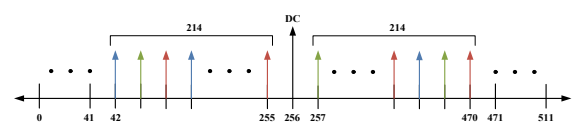
OFDM 기반 시스템에서는 수신 단 성능에 심각한 영향을 주는 동기 성능의 향상을 위해 프레임의 첫 번째 신호에 프리앰블 심볼을 전송하여 동기를 획득한다 [4]-[5]. AeroMACS 시스템의 114개 프리앰블 시퀀스는 서로간의 상호 상관 특성이 적고, PAPR (peak to average power ratio)이 낮은 PRBS (pseudo random binary sequency)값으로 정의된다. 프리앰블을 구성하는 부반송파는 특정 PN코드가 BPSK (binary phase shift keying) 변조되어 전송되며, 규격에서 명시한 수식 (1)의 프리앰블 전송그룹 (preamble carrier set)에 의해 주파수 영역에서 segment 별로 배치되어 전송 된다 [6].

$$PreambleCarrierSet_{s_q} = s_q + 3 \cdot k + N_{GL} \quad (1)$$

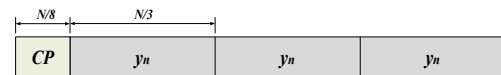
여기서 s_q, k, N_{GL} 는 각각 preamble carrier set index로 0, 1, 2를 나타내고, k 는 0~143개의 주파수 index를 의미하여, N_{GL} 은 주파수 영역에서 왼쪽에 매핑되는 가상 반송파를 의미한다. 프리앰블은 3개의 부반송파마다 신호가 배치되므로, 시간 영역에서 세 번 반복되는 특성을 갖는다. 그림 1은 AeroMACS 5 MHz profile의 프리앰블 시퀀스를 주파수영역과 시간영역에서 보여준다. 그림 1-(b)에서 y_n 은 시간 영역에서 세 번 반복되는 신호를 의미하고, CP (cyclic prefix)는 ISI (inter symbol interference)를 방지하기 위해 전체 신호에서 마지막 $N/8$ 지점을 복제해서 붙인 신호를 의미한다.

III. 동기 알고리즘

수신 단에서 동기가 이루어지지 않은 경우 이산시간에서 기



(a) 주파수 영역 구조



(b) 시간 영역 구조

그림 1. AeroMACS 시스템 프리앰블 구조
Fig. 1. AeroMACS preamble structure.

저대역 신호는 수식 (2)와 같이 주어진다.

$$r(n) = y(n - \delta) \cdot e^{j(2\pi n \epsilon + \phi)} + w(n) \quad (2)$$

여기서 ϵ 과 δ 는 정규화 된 반송파 주파수 오차, 심볼 타이밍 오차를 각각 나타낸다. 동기화가 이루어지지 않은 경우, 수신 신호는 ICI (inter carrier interference)와 ISI가 발생하여 부반송파 사이의 직교성이 파괴되고 수신단의 복조성능은 크게 저하된다.

AeroMACS 시스템의 동기단은 크게 세 가지로 구분된다. 첫 번째로 OFDM 심볼의 시작 위치를 획득하는 시간 동기단, 두 번째는 송신기와 수신기의 발진기가 동일하지 않거나, 채널의 영향에 따라 발생하는 도플러 주파수 천이에 의해 발생하는 주파수 오차를 보정하는 주파수 동기단이 있으며, 마지막으로 셀 아이디 식별을 위한 셀 탐색 단으로 구분된다.

3-1 시간 동기 알고리즘

시간 동기를 획득하기 위해 동기 단은 자기상관 또는 상호상관 연산을 이용해 수신 신호의 데이터 시작 지점을 추정하게 된다. AeroMACS 시스템에서는 수신 단 설계의 복잡도를 줄이기 위해 자기상관 기반의 시간동기 회로를 일반적으로 사용한다.

AeroMACS 시스템의 프리앰블 신호는 시간 영역에서 세 번 반복되는 특성을 갖는다. 하지만, 세 번 반복되는 시점의 값은 완벽하게 동일하지 않은 특성을 갖게 된다. 그 이유는 주파수 영역에서 생성된 신호를 512-point IFFT 취하는 프리앰블 신호는 정확히 시간 영역에서 3으로 나누어 지지 않는다. 결과적으로 주파수 영역에서 남아 있는 위상 성분에 의해 시간 영역에서는 지연된 특성을 갖는다. 이와 같은 특성으로 인해 프리앰블 신호에 대한 자기 상관 연산 특성은 감소한다[7]. 상관 특성을 개선하기 위해 수신된 프리앰블 신호에 대해 선형 보간 연산을 수행 하여 보정 된 신호 y_0, y_1, y_2 를 이용하여 동기 연산을 수행하며 기존 알고리즘 대비 높은 상관 특성을 갖는 metric을 얻는다. 그림 2는 시간 동기 알고리즘의 상관기를 그림으로 도시한 것이고 그림 3은 시간 동기 알고리즘의 블록도를 나타낸 그림이다.

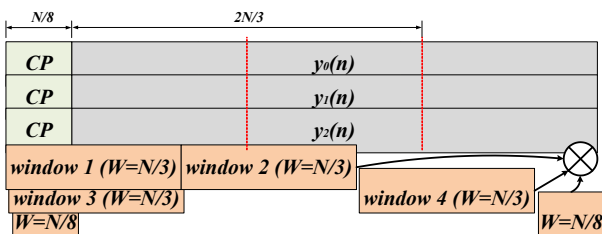


그림 2. 시간 동기 알고리즘
Fig. 2. Time synchronization algorithm.

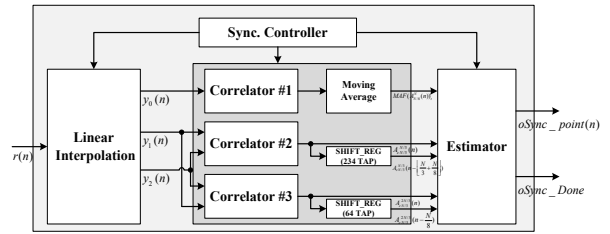


그림 3. 시간 동기 알고리즘의 블록도
Fig. 3. Block diagram of time sync algorithm.

시간 동기 알고리즘은 수식 (3)-(6)으로 정의되고, metric은 그림 4로 도시된다.

$$M(n) = M_1(n) \cdot M_2(n) \cdot M_3(n) \quad (3)$$

$$M_1(n) = A_{cN/3}^{N/3}(n) \cdot A_{cN/3}^{N/3}\left(n - \left\lfloor \frac{N}{3} + \frac{N}{8} \right\rfloor\right) \quad (4)$$

$$M_2(n) = A_{cN/3}^{2N/3}(n) \cdot A_{cN/3}^{2N/3}\left(n - \frac{N}{8}\right) \quad (5)$$

$$M_3(n) = MAF(A_{N/8}^N(n))_t \quad (6)$$

수식 (4)-(6)은 $M(n)$ 를 최종적으로 계산하기 위해 필요한 Sub-metric 수식을 나타낸다. 수식 (4)에서 $A_{cN/3}^{N/3}(n)$ 은 시퀀스 $y_1(n), y_2(n)$ 를 상관 윈도우 ($W=N/3$), 지연 ($D=N/3$)길이를 취한 상호 상관 연산을 의미한다. $A_{cN/3}^{N/3}\left(n - \left\lfloor \frac{N}{3} + \frac{N}{8} \right\rfloor\right)$ 은 $A_{cN/3}^{N/3}(n)$ 의 metric을 지연 ($D=N/3+N/8$)해서 얻은 metric이다. $A_{cN/3}^{2N/3}(n)$ 역시 시퀀스 $y_1(n), y_2(n)$ 의 상호 상관 연산을 의미하며, 상관 윈도우 ($W=N/3$)를 갖고 지연 ($D=2N/3$)후 수신되는 신호와 연산을 한다. $A_{cN/3}^{N/3}\left(n - \left\lfloor \frac{N}{3} + \frac{N}{8} \right\rfloor\right), A_{cN/3}^{2N/3}(n), A_{cN/3}^{2N/3}\left(n - \frac{N}{8}\right)$ 의 수식은 $A_{cN/3}^{N/3}(n)$ 과 유사하여 $A_{cN/3}^{N/3}(n)$ 에 대해서만 수식 (7)-(10)로 전개하였다.

$$A_{cN/3}^{N/3}(n) = \frac{4 \cdot |C_{cN/3}^{N/3}(n)|^2}{(P_{cN/3}^0(n) + P_{cN/3}^{N/3}(n))^2} \quad (7)$$

$$C_{cN/3}^{N/3}(n) = \sum_{k=0}^{N/3-1} y_1(n+k) \cdot y_2^*(n+k+N/3) \quad (8)$$

$$P_{cN/3}^0(n) = \sum_{k=0}^{N/3-1} y_1(n+k) \cdot y_1^*(n+k) \quad (9)$$

$$P_{cN/3}^{N/3}(n) = \sum_{k=0}^{N/3-1} y_2(n+k+N/3) \cdot y_2^*(n+k+N/3) \quad (10)$$

수식의 $y_n(n), C(n), P(n), A(n)$ 은 각각 수신 신호, correlation 연산 값, 수신 신호의 power, 그리고 correlation 값을 [8]에서와 같이 정규화 하여 최종적으로 얻은 metric값을 의미 한다. 그리고 n, D는 시간 영역에서의 index와 상관 윈도우의 delay길이를 의미한다. 논문에서 수식 표현은 다음과 같이

정의한다. $A_{N/8}^D(n)$ 에서 아래첨자 W 는 상관 윈도우 길이를 의미하고 위첨자 D 는 지연 길이를 의미한다. 그리고 A_c 의 값은 상호 상관을 의미하고 A 는 자기 상관 연산을 의미한다.

수식 (6)의 $A_{N/8}^N(n)$ 은 시퀀스 $y_0(n)$ 에 상관 윈도우($W=N/8$)를 취하여 얻은 자기 상관 연산을 의미한다. 수식 (11)-(14)는 $A_{N/8}^N(n)$ 수식을 표현한 것이다.

$$A_{N/8}^N(n) = \frac{4 \cdot |C_{N/8}^N(n)|^2}{(P_{N/8}^0(n) + P_{N/8}^N(n))^2} \quad (11)$$

$$C_{N/8}^N(n) = \sum_{k=0}^{N/8-1} y_0(n+k) \cdot y_0^*(n+k+N) \quad (12)$$

$$P_{N/8}^0(n) = \sum_{k=0}^{N/8-1} y_0(n+k) \cdot y_0^*(n+k) \quad (13)$$

$$P_{N/8}^N(n) = \sum_{k=0}^{N/8-1} y_0(n+k+N) \cdot y_0^*(n+k+N) \quad (14)$$

수식 (3)-(6)을 다시 분석하면, 수식 (3)에서 $M_1(n)$ 은 metric $A_{c \cdot N/3}^{N/3}(n)$ 을 ($D=N/3+N/8$) 지연시켜 얻은 metric $A_{c \cdot N/3}^{N/3}(n - \lfloor \frac{N}{3} + \frac{N}{8} \rfloor)$ 과의 곱한 결과를 의미한다. $M_2(n)$ 은 metric $A_{c \cdot N/3}^{2N/3}(n)$ 을 ($D=N/8$) 길이만큼 지연시켜 얻는 metric $A_{c \cdot N/3}^{2N/3}(n - \frac{N}{8})$ 이다. $M_3(n)$ 는 $A_{N/8}^N(n)$ 에 대해 t-point moving-average filter를 통과시켜 단일 지점의 특성을 보정한 metric이다. 수식 (6)의 수식은 수식 (15)로 표현할 수 있으며 만약 3-point moving-average filter를 통과시킨다면 수식 (16)로 표현된다.

$$MAF(A_{N/8}^N(n))_t = \frac{1}{t} \sum_{k=0}^{t-1} A_{N/8}^N(n+k) \quad (15)$$

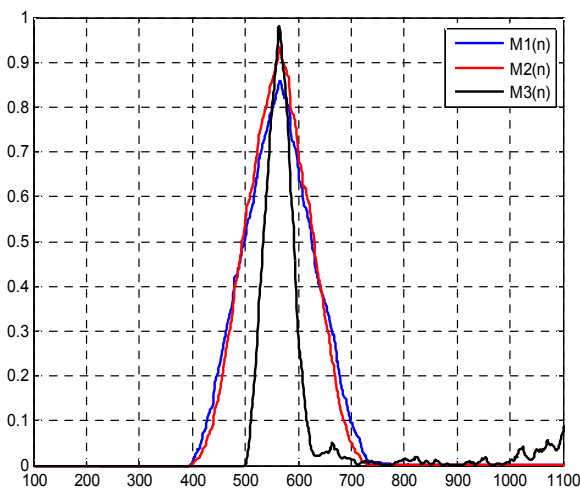


그림 4. 시간 동기 알고리즘 메트릭 비교

Fig. 4. Metric of time synchronization algorithm.

$$M_3(n)_3 = MAF(A_{N/8}^N(n))_3 = \frac{A_{N/8}^N(n) + A_{N/8}^N(n+1) + A_{N/8}^N(n+2)}{3} \quad (16)$$

설명한 시간 동기 알고리즘은 다섯 개의 연산 결과를 곱하여 최종 metric을 얻는다. 그림 4를 통해 확인해 보면 최종 metric은 심볼이 시작하는 지점에서 단일 최고값을 갖게 되며 신호 이외의 지점은 필터를 통과한 신호처럼 표현된다. 그리고 상관 연산을 통해 얻은 metric을 곱함으로써 최고값 이전과 이후의 기울기 지점에 대해 원치 않는 local 지점이 감소하는 형태의 metric을 얻는다. 이는 데이터 시작 지점 $n=565$ 지점을 기준으로 metric의 형상이 날카롭게 구성되는 것을 확인 할 수 있으며, 이와 같이 우수한 상관 특성으로 인해 시간 동기 획득 성능이 향상된다.

3-2 주파수 동기 알고리즘

1) AeroMACS 시스템 주파수 오차 범위

AeroMACS 시스템의 주파수 오차 발생 범위는 주파수 대역 값 5 GHz와 발진기 오차 ± 5 ppm 값에 의해 수식 (17), (18)로 정의된다.

$$f_{\Delta} = BW \cdot f_{LO} = 5 \cdot 10^9 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{ (Hz)} \quad (17)$$

$$\varepsilon = \frac{f_{\Delta}}{f_{Ts}} = \frac{50k}{10.94k} \cong \pm 4.57 \quad (18)$$

여기서 f_{Δ} , ε , BW , f_{LO} , f_{Ts} 는 각각 발생 가능 주파수 오차, 정규화된 주파수 오차, 채널 대역폭, 송·수신 단에서 발생 가능한 최대 발진 주파수 오차, 부반송파 간격을 의미한다.

AeroMACS 시스템에서 발생 가능한 주파수 오차 범위는 ± 4.57 이고 정수배 주파수 오차 부분은 프리앰블의 반복되는 구간을 통해서 정수배 오차를 추정 할 수 없으므로, 셀 탐색을 수행할 때 동시에 추정한다. 범위 -5 ~ +5에 대해 추정을 하고, 추정 후 남은 소수배 주파수 오차는 프리앰블의 CP 구간에 자기 상관을 통해 주파수 오차를 추정한다.

2) Integer Offset 추정 알고리즘 (셀 탐색)

주파수 오차의 추정은 정수배 주파수 오차를 먼저 추정 후, 소수배 주파수 오차를 추정하는 순서로 진행된다. 주어진 프리앰블 만으로는 (-0.5 ~ +0.5) 정수배 오차를 추정할 수 없기에 셀 탐색 단을 통해 정수배 오차를 추정한 후, 소수배 오차를 추정한다. 추정 방법은 송신 단에서 전송될 수 있는 프리앰블 시퀀스가 114개 이므로, 정수배 오차가 발생되지 않은 38개의 신호와 정수배 오차 발생 가능한 -5 ~ +5의 케이스에 대한 시퀀스를 각각 생성하여 총 $10 \cdot 38 + 38 = 418$ 개의 시퀀스를 수신 단으로 들어오는 프리앰블 신호에 상호상관 취하여 가장 큰 연산 값을 선정하고, 이 때의 값을 토대로 정수배 주파수 오차를 추정하게 된다.

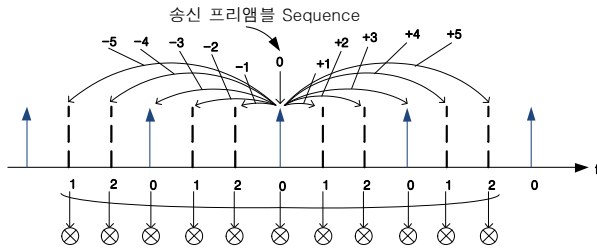


그림 5. 셀 탐색 알고리즘
Fig. 5. Cell search algorithm.

그림 5는 주파수영역에서 셀 탐색을 위해 주파수영역에서 수신된 신호에 대해 발생 가능한 정수배 주파수 오차에 해당하는 시퀀스를 생성 후, 각 시퀀스 별로 연산하는 과정을 그림으로 나타낸 것이다. 셀 탐색 과정은 정수배 주파수 오차를 추정할 때 동시에 진행된다.

3) Fractional Offset 추정 알고리즘

정수배 주파수 오차를 추정 후, 남은 소수배 주파수 오차는 프리앰블의 반복되는 CP 구간 특성을 이용하여 계산하며, 추정 가능한 주파수 오차는 수식(19)로 표현할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\hat{f}_\Delta}{f_s} = \frac{1/(2 \cdot D \cdot T_s)}{1/T_s} = \frac{1/(2 \cdot D \cdot T_s)}{1/N \cdot T_s} = \frac{N}{2 \cdot D} \quad (19)$$

여기서 D , \hat{f}_Δ , T_s , T_{Ts} , N 은 지연 구간, 추정 가능 주파수 범위, 샘플링 시간, OFDM 심볼 길이, 그리고 FFT point를 의미한다. 식 (19)를 토대로 AeroMACS 시스템에서는 프리앰블 심볼의 CP 구간의 반복되는 특성을 이용해서 소수배 주파수 -0.5 ~ +0.5 범위에 대해 주파수 오차를 추정 할 수 있다. 보상 과정을 예로 설명하면, segemnt 0번째의 시퀀스에서 -2.8의 주파수 오차가 발생한 경우, 셀 탐색을 통해 +3의 오차를 보상하면 $-2.8 + 3 = +0.2$ 의 소수배 오차가 남게 되고, +0.2를 프리앰블 신호를 이용해 소수배 오차를 추정하여 NCO (numerically controlled oscillator)를 통해 보상한다.

3-3 시뮬레이션 및 성능 분석

지금까지 분석한 알고리즘에 기반해서 AeroMACS 시스템의 동기 시뮬레이션을 진행하였다. 성능 평가를 위해 다양한 AeroMACS 채널 모델에서 성능 평가가 진행되었으며, 채널 모델은 German aerospace center (GAC)의 채널 모델을 사용하였다 [9].

AeroMACS 시스템의 채널 모델링에 대한 다양한 연구가 진행되고 있지만 그 중 GAC의 채널 모델은 항공채널을 각각 NLOS, LOS 환경으로 구분 후 수신하는 위치에 따라 각각 apron (APR), runway (RWY), taxiway (TWY), park (PRK)의

표 2. 환경에 따른 채널 파라미터

Table. 2. Channel parameters used for the different scenarios.

	APR	PRK	TWY	RWY
K [dB]	0, 10, 20	0, -10	0, 10, 20	0, 10, 20
σ_τ [us]	0.65	1.25	1.5	1.05
$\sigma_{f_{Dmin}}$ $\sigma_{f_{Dmax}}$ [Hz]	20, 50	10, 40	40, 95	100, 200
f_{dmax} [Hz]	140	50	150	500
N_t	9	12	6	7
N_s	25	25	25	25

다양한 환경에 대한 채널 모델과 그에 따른 PDP (power delay profile) 모델을 제시하였다. 각 채널은 exponential decaying 모델을 가정하였고 각각의 채널 파라미터는 표 2와 같다. 여기서 K , σ_τ , $\sigma_{f_{Dmin}}$, $\sigma_{f_{Dmax}}$, f_{dmax} , N_t , N_s 는 각각 Rician K-factor, delay spread, Doppler spread values, maximum Doppler shifts, number of taps, number of scatterers를 의미한다. Exponential decaying 채널 모델은 채널의 평균 전력이 지수적으로 감쇄 하는 모델로써, 수식 (20)과 같이 표현 된다.

$$P(p) = P(0) \cdot e^{-p \cdot T_s / \sigma_\tau}, \quad p = 0, 1, \dots, p_{max} \quad (20)$$

여기서 $P(0)$ 는 전체 전력을 1로 정규화 하기 위한 첫 번째 경로의 전력이고, p_{max} 는 각각 샘플링 주기 T_s 에 의하여 이산화 된 최대 지연을 갖는 마지막 경로의 index를 의미하고, σ_τ 는 rms 지연 확산을 의미한다.

7가지의 채널 모델에 기반 해서 수신 신호는 채널 통과 후 열 잡음이 가해지며, 10 ppm의 주파수 오차가 존재하는 것으로 가정하였다. 표 3은 시뮬레이션 환경을 정리한 표이다.

1) 시간 동기 획득 알고리즘 성능 평가

그림 6은 AeroMACS 시스템의 채널 모델에 대해 시간 동기 획득 성능을 분석한 그래프이다.

표 3. 시뮬레이션 환경

Table. 3. Simulation environments.

Parameter	Value
Bandwidth	5 MHz
Sampling Frequency	5.6 MHz
Sampling Time	178.57 ns
FFT Length	512
Number of Used Subcarrier	420
Effective Symbol Period	91.4 us
Cyclic prefix length	11.4 us
Symbol Period	102.9 us

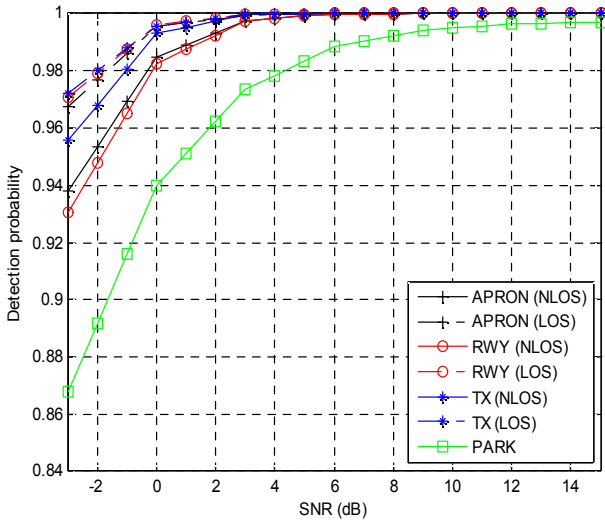


그림 6. 시간 동기 획득 성능
Fig. 6. Detection probability of timing sync.

7가지 채널 모델에 대한 시간 동기 알고리즘을 적용한 결과 park 채널 모델을 제외한 나머지 채널 모델의 경우 SNR 6 dB 기준으로 시간동기 획득 성공률이 100%를 만족함을 확인할 수 있다. 그리고 LOS성분이 포함 된 채널 모델의 경우 NLOS 채널 모델 보다 시간 동기 성능이 우수함을 확인할 수 있다. park 채널 모델의 경우 다른 채널 모델에 비해 시간 동기 획득 성능이 낮는데, 이는 park 채널 모델의 경우 다중 경로 (multi-path)값이 12-tap으로 다른 채널 모델보다 많은 다중 경로를 갖고 있으며, 이로 인해 상관 연산을 계산하여 얻게 되는 최종 metric의 특성이 다른 채널 모델의 경우보다 열화 되어 시간 동기 획득 성능이 저하된 것으로 판단된다. 하지만 SNR이 증가함에 따라 park 채널 모델의 시간 동기 획득 역시 100%에 근접한다.

2) 소수배 주파수 오차 추정 성능 및 분석

고속 이동 채널환경인 AeroMACS 시스템은 OFDM 시스템을 기반으로 하는 무선랜과 WiMAX 시스템보다 도플러의 영향을 더 강하게 받는다. 이전 시간동기 추정 성능은 도플러 천이에 크게 영향 받지 않음을 확인할 수 있다. 주파수 오차의 경우 수신 단에서 주파수 오차가 발생하는 이유가 크게 송수신단의 발진기 오차와 이동성을 갖고 있는 시스템 환경에서 운용되는 경우 도플러 주파수 영향으로 오차가 발생되며, AeroMACS 시스템의 경우 고속의 이동환경 시스템으로 인해 주파수 오차 영향이 더욱 클 것이다. 그림 7은 시간 동기 채널 모델과 동일한 채널 모델 7가지에 대해 소수배 주파수 오차 추정 성능을 MSE (mean square error) 성능으로 평가한 그래프이다. 추정 알고리즘은 프리앰블의 CP 구간에 대해 상관함수를 이용하여 주파수 오차를 추정하였고, 소수배 오차는 -0.5 ~ +0.5를 발생시켰다.

성능 그래프를 확인해 보면, 도플러 주파수가 가장 큰, 즉 가

장 고속 환경인 runway 환경이 MSE 성능이 가장 낮은 경향을 보인다. 그리고, apron (NLOS) 채널 모델을 제외한 나머지 4개의 채널모델은 15 dB를 기점으로 SNR이 증가해도 MSE 성능이 좋아지지 않았으며, 유일하게 apron (NLOS) 채널 모델의 경우 MSE가 떨어짐을 확인하였다.

3) 셀 탐색 추정 성능 및 분석

셀 탐색 추정은 시간 동기 단에서 획득한 프리앰블 심볼의 시작지점을 토대로 수신 단에서 미리 114개의 시퀀스를 저장한 데이터와 상호상관을 취해서 가장 큰 연산값을 선정해서 추정 값이 실제 셀 아이디, segment, 정수배 오차와 동일한 경우를 셀 탐색 성공의 기준으로 설정하였다. 상호 상관 시간 동기의 오차를 보정하기 위해 시간 동기 단에서 획득한 프리앰블 심볼과 저장 된 114개의 시퀀스는 수식 (21), (22)로 보정되어 연산이 수행된다.

$$Z_{3k} = R_{3k} \cdot R_{3k+3}^* \tag{21}$$

$$B_{3k}^s = c_{3k} \cdot c_{3k+3}^* \tag{22}$$

여기서 R_{3k} , c_{3k} , Z_{3k} , B_{3k}^s 는 수신 된 프리앰블 심볼의 주파수 영역 신호, 수신 단에서 미리 알고 있는 프리앰블 심볼, 보정된 프리앰블 심볼, 보정된 알고 있는 프리앰블 심볼을 의미한다.

그림 8은 7개의 채널 모델 중 park 채널 모델을 기준으로 셀 탐색 성능을 분석한 그래프이다. SNR에 따라 보정을 하지 않고 셀 탐색을 수행 하는 경우 셀 탐색 성능은 매우 저조함을 확인할 수 있다. 보정한 케이스로 셀 탐색을 수행하는 SNR 5dB 기준으로 셀 탐색 성능이 99%대로 접근함을 확인할 수 있다.

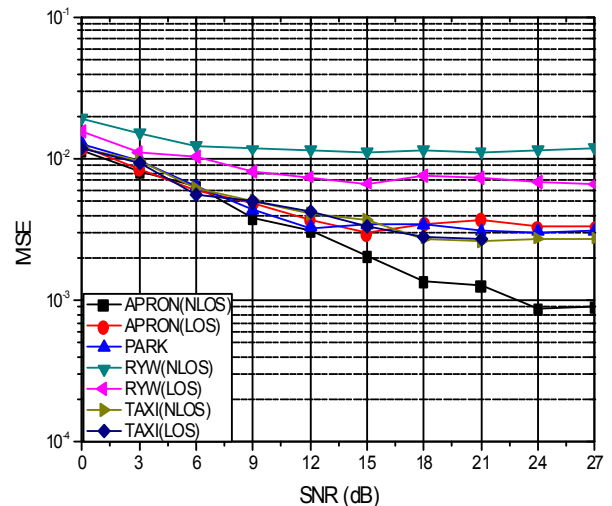


그림 7. 소수배 주파수 오차 추정 성능 평가
Fig. 7. Fractional freq. offset sync. evaluation.

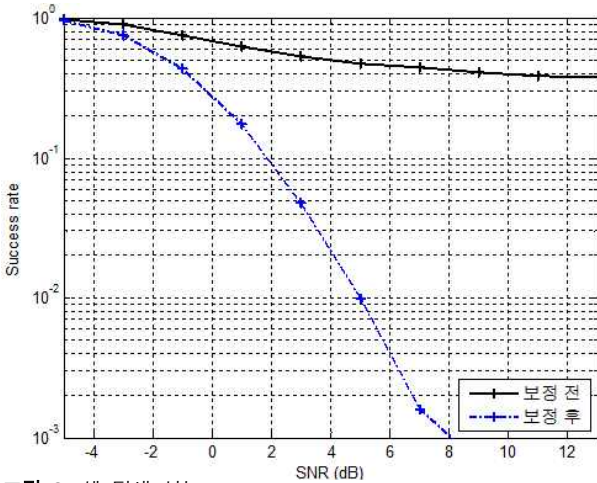


그림 8. 셀 탐색 성능
Fig. 8. Cell search performance.

IV. 하드웨어 구현 결과

4-1 동기 단 설계

동기 단의 회로 구성은 크게 다섯 블록으로 구성 된다. 수신 신호의 데이터 시작 지점을 추정하는 시간 동기회로, 셀 탐색과 정수배 주파수 오차를 추정하기 위한 셀 탐색 단, 소수배 주파수 오차 추정을 위한 소수배 주파수 동기 단, 추정된 주파수 오차의 값을 수신 신호에 보상하기 위해 위상 성분을 생성하는 NCO 회로, 그리고 동기회로의 동작을 제어하는 컨트롤러 회로로 구성된다. 그림 9는 동기 단의 하드웨어 블록 다이어그램을 나타낸 그림이다.

그림 10은 동기 단 회로의 동기 획득 과정을 표현한 그림이다. 5ms 간격으로 프레임이 수신 단으로 인가 되며, 각 프레임 별로 동기회로는 다르게 동작된다. 첫 번째 프레임에 대해 동기 회로는 시간 동기를 통해 데이터의 수신 여부를 판단하고, 두 번째 프레임에는 시간 동기화 및 셀 탐색을 수행한다. 세 번째 프레임에서는 시간 동기화 및 셀 탐색, 소수배 주파수 오차 추정을 수행하고, 마지막 네 번째 프레임에서는 시간 동기화 획득 후, 이전 프레임의 시간 동기 획득 지점과 일정 오차 간격을 넘여가

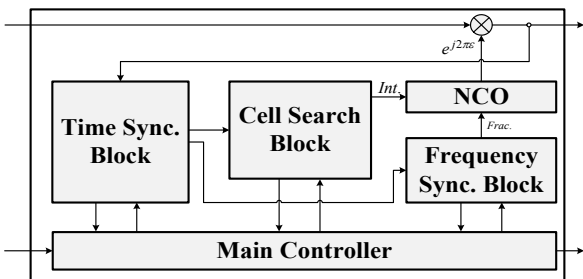


그림 9. 동기 단 블록 다이어그램
Fig. 9. Block diagram of synchronizer.

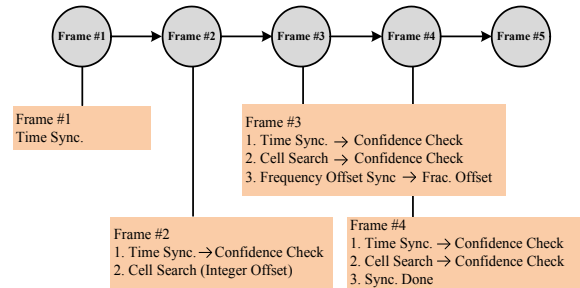


그림 10. 동기단 동작 흐름
Fig. 10. Operation flow of synchronizer unit.

는 경우 시간 동기 실패로 간주하여 다시 시퀀스는 반복된다. 이와 같은 시퀀스로 이상적인 경우 4번의 프레임 만에 동기를 완료하게 된다.

4-2 시간 동기 블록

그림 11은 시간 동기 단 회로의 하드웨어 블록도를 나타낸 그림이다. 시간 동기 단은 수신된 신호의 상관 특성을 높이기 위해 시퀀스를 보정하는 선형 보간 회로와 상관 연산을 수행하기 위한 상관기가 3개 존재한다. 세 개의 metric 중 두 metric은 일정 구간 지연시켜서 두 개의 새로운 metric을 얻고 나머지 자기 상관 연산의 결과에 대해서는 moving average filter를 통과시켜 새로운 metric을 얻어서 총 5개의 metric을 이용해서 시간 동기를 획득한다.

그림 12, 13은 각각 시간 동기회로의 상관 연산회로와 moving average filter의 하드웨어 블록도를 나타낸 그림이다.

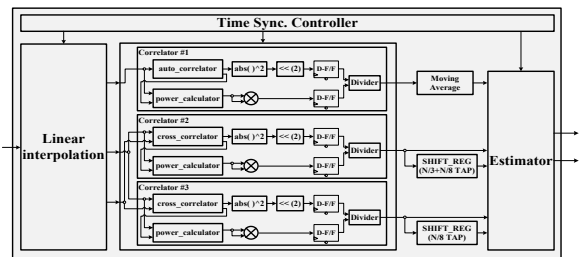


그림 11. 시간 동기 회로 블록
Fig. 11. Time synchronizer block.

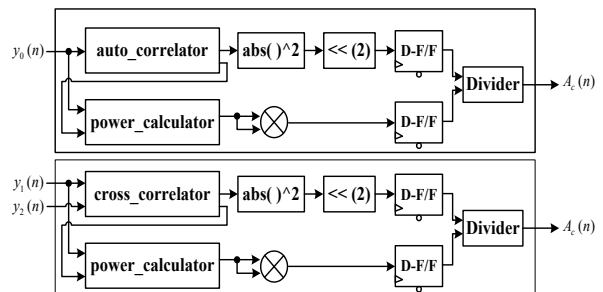


그림 12. 상관 연산기 회로
Fig. 12. Correlator block.

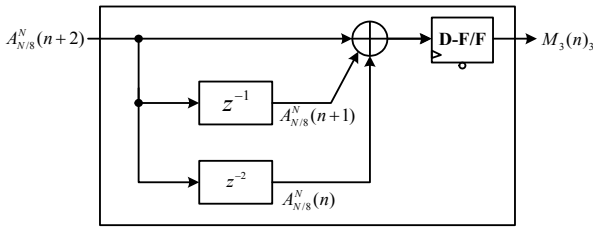


그림 13. 이동 평균 필터
Fig. 13. Moving average filter.

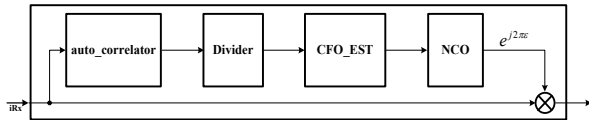


그림 14. 소수배 주파수 오차 추정 회로 블록
Fig. 14. Fractional freq. offset estimator block.

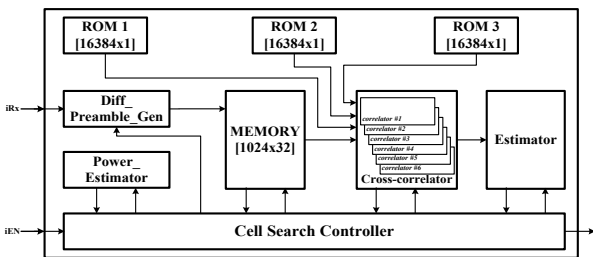


그림 15. 셀 탐색부 블록 다이어그램
Fig. 15. Block diagram of cell search unit.

4-3 소수배 주파수 동기 블록

그림 14는 소수배 주파수 오차 추정 회로의 하드웨어 블록도를 나타낸 그림이다. 소수배 주파수 동기 회로에서 수신 신호의 자기 상관 연산은 시간 동기단의 상관 연산 결과 값을 이용한다. 수신된 연산 결과를 통해 소수배 주파수 옵셋을 추정하고 NCO 단을 통해 보정 값이 생성된다.

4-4 셀 탐색 블록

그림 15는 셀 탐색 회로의 하드웨어 블록도를 나타낸 그림이다. 셀 탐색 회로내부에는 셀 탐색 동작을 위한 제어 로직과 셀 탐색 성능을 위한 프리앰블 보정 신호를 생성하는 블록과 6개 상호 상관 블록 그리고 연산 값의 전력 파워를 계산하기 위한

표 4. 구현 결과

Table. 4. Implementation results.

Parameter	Timing Sync.	Frac. offset Sync.	Cell Search Sync.	Sync. TOP
DSP48A1s	37 EA	-	34 EA	71 / 180 (39.4 %)
Block RAM/FIFO	6.275 kbyte	-	10.24 kbyte	16.515 kbyte
Number of Slice LUTS	5,616	1,567	7,739	14,922 / 92152 (16.2%)
Minimum period	8.806 ns (123 MHz)	7.928 ns (126MHz)	9.471 ns (105 MHz)	9.471 ns (105 MHz)



그림 16. FPGA 기반 연동 검증 환경
Fig. 16. FPGA verification environment.

블록으로 구성된다. 6개의 상관기는 하나의 시퀀스에 대해 롬에 저장된 프리앰블 시퀀스와 상호 상관을 수행하고 총 418번의 출력 값이 계산되어야 하므로 상관기 하나 당 70번의 상호 상관 연산을 수행한다. 셀 탐색 회로를 통해 정수배 주파수 오차와, 셀 아이디, segment 정보를 얻는다.

4-5 구현 결과

AeroMACS 시스템의 동기화기의 설계는 Xilinx 기반 합성을 진행하였다. 표 4는 동기 단 전체와 내부 회로의 구현 결과를 정리한 표이다.

구현된 결과물을 토대로 계측장비를 이용하여 FPGA 기반 보드 레벨에서 회로 검증을 진행하였다. 검증 환경은 AeroMACS 시스템의 프리앰블 생성 후 AWGN 채널 통과 한 신호에 대한 동기 획득 후 해당 신호를 signal analyzer를 통해 시간 동기, 셀 아이디, 주파수 옵셋 값을 확인하였다. 그림 16은 계측장비를 이용하여 FPGA 기반 보드 레벨에서 검증한 환경을 나타낸 사진이다.

V. 결론

본 논문에서는 항공통신용 AeroMACS 시스템을 위한 동기 알고리즘을 분석하고, AeroMACS 채널 모델에서 알고리즘 성능을 평가하였다. 그리고 상기 알고리즘을 이용한 AeroMACS 시스템용 동기화기를 설계 및 구현하고 결과물을 계측장비를 이용해 보드 레벨에서 검증하였다.

AeroMACS 시스템은 공항 내에서 운용되는 시스템으로 IEEE 802.16e WiMAX 시스템에 기반된 시스템이다. 하지

만 전송 주파수 대역과 대역폭이 다르고 공항 내 통신 환경에 적합한 새로운 채널 모델이 정의된다. 기존의 WiMAX 시스템에서 사용되는 알고리즘을 통해 동기 성능을 분석한 결과 시간 동기 성능의 경우 전 채널에 대한 시간 동기 획득 성능이 우수한 것으로 분석된다. 주파수 오프셋의 경우 정수배 주파수 동기는 셀 탐색을 통해 보정이 가능하며, 소수배 주파수 오프셋의 경우 채널 모델에 따라 추정 성능이 다르다. 고속 채널 환경인 runway 채널 모델의 경우 NLOS 성분으로 인해 현 알고리즘으로는 주파수 오프셋 추정이 불가능하므로 성능 향상을 위해서는 다른 알고리즘의 적용이 필요한 것으로 생각된다. 마지막으로 성능 평가를 수행한 동기 알고리즘을 토대로 Xilinx 기반 Virtex6-150T FPGA device에서 구현 및 검증을 통해 AeroMACS 시스템 동기 블록의 검증을 수행하였다.

감사의 글

본 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2011-0013076)을 받아 수행되었고, CAD Tool은 IDEC 으로부터 지원 받았음.

참고문헌

[1] E. S. Lee, K. G. Sohn, Y. O. Park, and Y. H. Jung, "Performance analysis of timing synchronization scheme for AeroMACS system," *The Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 16, No. 2, pp. 255-263, Apr. 2012.

[2] E. Hall, J. Budinger, R. Dimond, J. Wilson and R. Apaza, "Aeronautical mobile airport communications system development status," in *Proceeding of Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference*, Herndon: VA, pp. A4-1 – A4-15, 2010.

[3] H. Corporation, Aeronautical mobile airport communications system profile, RTCA SC-223. Mar. 2011.

[4] T. M. Schmidl and D.C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 45, No. 12, pp. 1613 – 1621, Dec. 1997.

[5] J. J. Van de Beek, M. Sandell and P. O. Borjesson, "ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 45, No. 7, pp.1800-1805, July. 1997.

[6] IEEE standard for local and metropolitan area networks Part 16, IEEE std 802.16e, Mar. 2006.

[7] E. Seagraves, C. Berry and Feng Qian, "Robust mobile WiMAX preamble detection," in *Proceeding of Military Communications Conference*, San Diego: CA, pp. 1-7, 2008.

[8] S. Muller-Weinfurter, "On the optimality of metrics for coarse frame synchronization in OFDM : a comparison," in *Proceeding of the 9th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 533-537, Boston: MA, 1998.

[9] P. Pulini, "Forward link performance analysis for the future IEEE 802.16-based airport data link," in *Proceeding of IEEE International Conference on Communications*, Cape Town: RSA, pp. 1-5, 2010.



장수현 (Soohyun Jang)

2009년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과(공학사)
 2011년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과(공학석사)
 2011년 3월~현재 : 한국항공대학교 항공전자공학과 박사과정
 ※ 관심분야 : MIMO/OFDM 통신 시스템, 항공통신 시스템, VLSI 신호처리, 모뎀 SoC



이은상 (Eunsang Lee)

2011년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과
 2013년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과(공학석사)
 2013년 3월 ~ 현재 : 현대자동차 연구원
 ※ 관심분야 : MIMO/OFDM 통신 시스템, 항공통신 시스템, VLSI 신호처리, 모뎀 SoC



정윤호 (Yunho Jung)

1998년 2월 : 연세대학교 전자공학과
 2000년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2005년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 2005년 ~ 2007년 : 삼성전자 책임연구원
 2007년 ~ 2008년 : 연세대학교 연구교수
 2008년 ~ 현재 : 한국항공대학교 부교수
 ※ 관심분야 : MIMO/OFDM 통신 시스템, 항공통신 시스템, VLSI 신호처리, 모뎀 SoC