

# 저피탐 전술데이터링크 통신을 위한 직접 시퀀스 대역 확산 적용 방안 연구

김재원, 최신욱, 송대영

국방과학연구소

arbor405@add.re.kr, schoi@add.re.kr, daeyoungsong@add.re.kr

## A Study on the Effect of Direct Sequence Spread Spectrum for LPD Communication in TDL System

Jaewon Kim, Sinuk Choi, Daeyoung Song

Agency For Defense Development

### 요약

스텔스 능력을 보유한 체계에 탑재되는 전술데이터링크는 스텔스 성능을 유지하기 위해 저피탐 통신이 가능하여야 한다. 직접 시퀀스 대역 확산(DSSS)은 전송 심볼에 확산 코드를 곱해 신호를 더 넓은 주파수 대역으로 확산시켜 송신하는 기법으로 저피탐 통신에 많이 사용된다. 본 논문에서는 저피탐 전술데이터링크 통신을 위해 직접 시퀀스 대역 확산의 확산인자 및 통신거리에 따른 저피탐 통신 가능성에 대해 알아보았다. 적의 수신한 아군 신호의 세기가 열잡음보다 작을 경우 탐지가 매우 어렵기 때문에 AWGN 채널 환경에서의 열잡음 세기를 기준으로 분석하였으며, 실제 하드웨어를 성능을 고려하여 DSSS의 적용 가능 수준을 고찰하였다.

### I. 서론

전술데이터링크는 전술정보를 근실시간으로 공유하여 전투 효과를 상승시키는 네트워크중심전(NCW: Network Centric Warfare)의 핵심 체계이다[1]. 전술정보란 상황인식·위협평가·지휘결심·교전통제 등 전술작전을 수행하기 위해 필요한 모든 정보를 포함한다. 대표적인 전술데이터링크로는 외국의 Link-16이 있으며 국내에는 Link-K 등이 있다. 전술정보의 실시간 공유 여부는 작전 성공 확률에 큰 영향을 미치므로 많은 항공기 및 전투기는 전술데이터링크를 탑재/운용하고 있으며, 최첨단의 미국 5세대 스텔스 전투기인 F-35에도 Link-16 등 여러 전술데이터링크가 탑재되어 운용중에 있다. 하지만, Link-16은 전방향으로 전파를 방사하는 스텔스를 고려하지 않은 시스템으로서 스텔스 개념을 보유한 체계에서의 운용은 스텔스 효과를 감소시킨다. 따라서, 스텔스 개념이 적용된 체계에서는 스텔스 특성을 보유한 스텔스 전술데이터링크가 필수적으로 요구된다. F-35 전투기의 경우 스텔스 모드에서는 Link-16을 수신모드로 운영하며, 스텔스 전술데이터링크인 MADL(Multifunction Advanced Data Link)을 통해 전술정보를 공유한다[2].

스텔스 전술데이터링크를 위한 저피탐(LPД: Low Probability of Detection) 통신에 대한 연구는 아직 국내에서 수행된 적이 없다. 다만, 일반적인 저피탐 통신에서는 대역 확산 기술이 기본적으로 적용된다. 대역 확산 기술은 크게 주파수 도약 대역 확산(FHSS: Frequency Hopping Spread Spectrum)과 직접 시퀀스 대역 확산(DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum)으로 나눌 수 있다. FHSS 기술은 시간에 따라 송신 주파수를 바뀌기며 통신하는 방법으로 항재밍 통신 관점에서는 장점이 있으나, 저피탐 통신 관점에서는 짧은 시간이지만 특정 주파수에서 강한 신호가 검출될 수 있으므로 단독으로 FHSS만 적용하기에는 어려움이 있다고 판단된다. DSSS 기술은 각 전송 심볼에 확산코드를 곱해서 주파수 대역 확산 효과를 보는 기법으로 송신전력을 넓은 주파수 대역으로 분산하여 송신하므로 저피탐 효과를 얻을 수 있다. 특히, 적의 신호검출기에 수신되는 아군 DSSS 신호의 세기가 열잡음(Thermal Noise) 보다 작을 경우 적

의 아군 신호 탐지는 매우 어려워진다. 본 논문에서는 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 채널 환경에서의 열잡음 세기를 기준으로 DSSS 확산 정도와 거리에 따른 저피탐 통신 가능성을 살펴보고, 실제 하드웨어를 고려한 DSSS 적용 방안에 대해 기술한다.

### II. 저피탐 통신을 위한 DSSS 적용 방안

신호의 탐지 기법은 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 신호의 에너지를 이용한 검출 기법을 고려한다. 또한, 수신 신호의 세기를 결정하는 요소에는 송신전력, 안테나 성능, 채널 상태 등 여러 요소가 있으나 본 논문에서는 자유공간경로손실(FSPL: Free Space Path Loss)을 반영한 AWGN 채널만을 고려하며 송신전력 1W, 안테나 이득 0dB로 가정한다. 자유공간 경로손실 및 열잡음 식은 다음과 같다.

$$FSPL(dB) = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi f}{c}\right)$$

$$Thermal\ noise(W) = kTB \quad (1)$$

여기서,  $d$ 는 거리,  $f$ 는 주파수,  $c$ 는 빛의 속도이며,  $k$ 는 볼츠만 상수,  $T$ 는 절대온도,  $B$ 는 주파수 대역폭을 의미한다.

그림 1은 확산인자(SF: Spreading Factor)에 따른 송신 신호의 전력 밀도(PSD: Power Spectrum Density) 및 열잡음의 PSD 이다. 송신 신호는 QPSK로 변조되었으며 SRRC(Square Root Raised Cosine) pulse shaping filter를 사용하여 생성하였다. 심볼레이트는 1 Msps 이며 열잡음 계산을 위한 온도는 상온(300K)으로 가정하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이, DSSS의 SF가 2배 증가함에 따라 전력 밀도는 약 3dB 씩 감소하며 이는 DSSS의 SF가 클수록 저피탐 통신으로의 효과가 증가함을 의미한다. 이론적으로 SF를 계속 증가시켜 송신되는 전력 밀도를 무제한으로 낮출 수 있고 이렇게 생성된 신호를 광대역 주파수에서 송/수신 가능하다면 저피탐 통신이 쉽게 이루어질 수 있으나, 모델/전력증폭기(AMP)/안테나

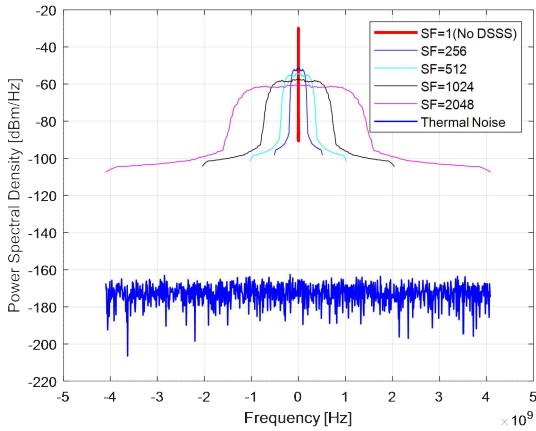


그림 1. DSSS SF에 따른 송신 신호 PSD 및 Thermal noise PSD

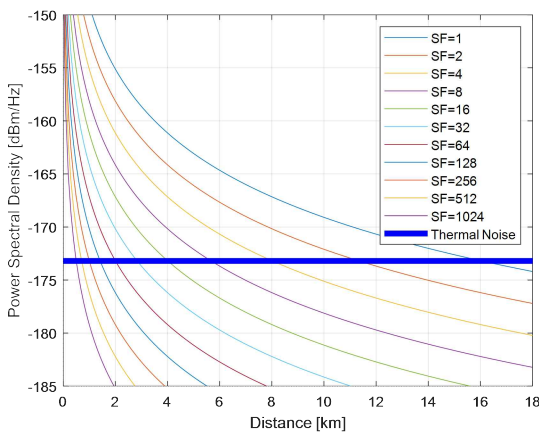


그림 2. 통신거리에 따른 수신 신호 PSD

등 하드웨어적인 제한사항이 있으므로 송신 전력 밀도를 무제한으로 낮추는 것은 현실적으로 불가능하다.

그림 2는 송/수신 플랫폼의 통신 거리에 따라 수신되는 신호의 전력 밀도를 나타내며 주파수는 K 대역으로 가정하였다. 적외선 신호를 검출하고자 시도하는 상황에서 적외선 신호검출기의 열잡음만을 고려했을 때 DSSS 미적용 신호는 약 17km 거리 이후에 열잡음보다 작아진다. 하지만, SF=1024의 경우 500m의 거리만 떨어지면 열잡음보다 수신신호가 작아지므로 저피탐 통신의 가능성을 크게 증대시킬 수 있으며 이는 저피탐 통신에서의 DSSS 효용성을 보여준다.

하지만, 앞에서 언급한 바와 같이 여러 가지 하드웨어적인 제한사항으로 송신 신호의 주파수 대역을 무제한으로 확산시킬 수는 없다. 본 논문에서는 여러 제한사항 중 모뎀 FPGA(Field Programmable Gate Array) 성능 제한에 초점을 맞춰 DSSS 적용 가능성을 고찰한다. 그림 3은 AMD사의 고성능 FPGA 제품인 Zynq UltraScale+ XCZU9EG 디바이스의 FIR(Finite Impulse Response) compier 성능표이다[3]. 클럭 최대 주파수 500MHz에서 600MHz 정도의 성능을 보여주고 있으며, 실제 DSSS 등의 변조 및 신호처리 블록 탑재 등 복잡한 구형에서는 더 낮은 속도로 동작 가능할 것이다. 상기 그림 1, 2에서 설정한 송신 신호 1 Msps를 기준으로 최저 4 오버샘플링을 가정했을 때, SF=128, 즉 512MHz가 현실적인 적정치로 판단된다. 이러한 분석을 그림 2에 적용하면, SF=128인 경우 약 1.5km의 통신거리 밖에서 수신 신호가 열잡음 밀도로 내려감을 확인할 수 있다.

Zynq UltraScale+								
Part Information		Configuration Parameters			Performance and Resource Utilization			
Device	Speed Grade	Configuration Name	Filter Type	Interpolation Rate	Fmax (MHz)	LUTs	FFs	DSPs
xczu9eg	1LV	zup_1_interpolation_102tap_parallel	Interpolation	5	577	344	832	12
xczu9eg	1LV	zup_1_interpolation_103tap_half_band_multi_chan	Interpolation	2	631	454	486	4
xczu9eg	1LV	zup_1_single_rate_102tap_semi_parallel_multi_col			610	352	952	14
xczu9eg	1LV	zup_1_single_rate_21tap_parallel			636	176	631	11

그림 3. Zynq UltraScale+ XCZU9EG 디바이스의 FIR Compiler 성능

상기의 모든 결과 및 분석들은 AWGN 채널에서의 안테나 이득을 고려하지 않은 결과이며 송신 전력은 1W로 고정하였다. 송신 전력, 운용 주파수, 송/수신 안테나 이득, 채널 상태, 수신기의 잡음지수(Noise figure) 등 많은 변수 및 조건들이 존재한다. 또한, 무엇보다 중요한 요소는 스텔스 전술데이터링크를 운용하는 플랫폼 및 체계의 운용개념이다. 적용체계의 최대/최소 통신거리, 고도, 적의 위치, 전장 환경, 지향성 안테나의 제원/성능 등 스텔스 데이터링크 운용개념을 고려하여 적절한 DSSS 설계요소를 설정함으로써 저피탐 통신 성능을 최적화시켜야 한다. 본 논문에서는 스텔스 전술데이터링크 운용개념 적용에 앞서 일반적으로 저피탐 통신에서 많이 사용되는 DSSS 기술의 적용 가능성 및 한계를 모뎀 하드웨어 성능을 고려하여 살펴보았다. DSSS 기술은 추후 운용환경을 고려하여 전력 조정(Power control), MCS(Modulation and Coding Scheme) 등의 기법과 함께 적용시 저피탐 통신 성능 향상을 위한 기반 기술로 활용될 수 있을 것이다.

### III. 결론

본 논문에서는 저피탐 전술데이터링크 통신을 위해 DSSS 기술의 적용 가능성 및 한계를 알아보았다. DSSS의 SF를 증가시킬수록 송신 전력이 확산되므로 저피탐 성능이 향상되나, 모뎀 하드웨어 성능을 고려시 1 Msps, 4 오버샘플링 신호를 기준으로 하였을 때, SF=128 정도가 적절한 수준으로 판단된다. DSSS의 SF 이외에 송신 전력, MCS 등 다양한 설계 요소가 있으며 스텔스 전술데이터링크 체계의 운용개념 및 환경에 따라 저피탐 성능이 달라지므로 이를 고려한 DSSS 적용이 필요할 것이다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년 정부의 재원으로 수행된 연구 결과임

### 참고 문헌

- [1] J.-W. Kim, et al., "A study on fast frequency hopping communication for anti-jamming in TDL system", J. KICS, Vol.43, No.01, pp. 175-180, 2018.
- [2] N. Grumman, Understanding Voice and Data Link Netw., Northrop Grumman Corp., Falls Church, VA, USA, 2014.
- [3] [http://download.amd.com/docnav/documents/ip\\_attachments/fir-compiler.html](http://download.amd.com/docnav/documents/ip_attachments/fir-compiler.html)