

무인항공기의 생존성 향상을 위한 항재밍 기법 구현 및 검증

박서현*, 차재룡°

Implementation and Validation of the Anti-Jamming Scheme to Enhance the Survivability of a Unmanned Aerial Vehicle

Seohyun Park*, Jaeryong Cha°

요약

본 논문은 무인항공기의 생존성 향상을 위하여 기존에 제안한 노치(Notch) 필터 기반의 재밍 신호 제거 기법을 하드웨어에 구현하고 성능을 검증한다. 본 논문은 성능분석 지표로써 수신품질, 초기 동기 획득 시간 및 톤 재밍 (Tone Jamming) 신호에 대한 항재밍(Anti-Jamming) 성능을 사용한다. 하드웨어 구현 및 성능 시험 결과, JSR(Jamming to Signal Ratio)이 낮은 경우에는 기존 널링(Nulling) 기법보다 제안하는 노치 기반 기법이 유효신호를 더 많이 제거하기 때문에 대역폭에 따라 1 dB 이내로 수신품질이 낮거나 유사한 반면 JSR이 높은 경우 제거하는 유효신호의 양보다 재밍 신호를 더 많이 제거하여 제안한 기법의 성능이 더 우수함(대역폭과 상관없이 향상 약 1~4 dB 우수함)을 알 수 있었다. 결론적으로 위성 기반 데이터링크 시스템에 본 논문에서 제안한 FFT(Fast Fourier Transform) 노치 필터 기반 항재밍 기법을 적용한다면 좀 더 효율적인 재밍 신호의 검출 및 제거 가능하므로 위성데이터링크의 생존성 및 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

키워드 : 무인항공기, 항재밍, 위성데이터링크, 노치 필터, 생존성

Key Words : UAV, Anti-jamming, Satellite datalink, Notch filter, Survivability

ABSTRACT

This paper implements and verifies the notch filter based anti-jamming scheme, which has been conventionally proposed to enhance the survivability of the unmanned aerial vehicle (UAV). As a performance metrics, this paper employs signal to noise ratio (SNR), initial synchronization acquisition time, and anti-jamming performance against to the tone jamming signal. According to the hardware implementation and performance test results, in case of low jamming to signal ratio (JSR), the proposed scheme shows the lower SNR performance(approximately less than 1 dB or similar depending on bandwidth) because the proposed scheme suppresses the more effective signal than the conventional nulling-based anti-jamming scheme. However, in case of higher JSR (e.g. 20 dB), the proposed scheme outperforms the conventional scheme because jamming signals are much more suppressed than the effective signal(approximately 1~4 dB better performance regardless of bandwidth). In conclusion, it is expected that the proposed notch based anti-jamming scheme will improve the survivability and reliability of a satellite data link if it is applied to a satellite-based datalink system.

* First Author : Defense Agency for Technology and Quality, seohyun@dtqa.re.kr, 정희원

° Corresponding Author : Agency for Defense Development, jrcha@add.re.kr, 정희원

논문번호 : 202009-236-D-RN, Received September 27, 2020; Revised November 27, 2020; Accepted December 9, 2020

I. 서론

최근 무인 항공기 시스템이 활발히 연구되고 있으며, 여러 분야에서 다양하게 활용되고 있다. 지상 장비와의 통신에 의해 운용되는 무인항공기의 특성 상 통신 시스템의 생존성이 매우 중요하며, 가시선 통신을 위한 가시선 데이터링크 외에 위성을 이용한 위성 데이터링크가 필수적이다. 위성통신 기술은 일반 무선 통신을 사용할 수 없는 지역이나 해상에서도 사용이 가능하며, 지상 재해의 영향을 받지 않는다. 또한 다수의 수신기로 동시에 데이터를 수신할 수 있는 장점이 있어 항공기 혹은 선박과 같은 이동 시스템에서 많이 활용되고 있다. 하지만 개방된 전송 채널을 사용하는 위성통신의 특성상 적에 의한 의도적 재밍 환경에 쉽게 노출될 수 있다는 단점이 있다^[1]. 따라서 항재밍 능력은 위성통신 시스템의 생존성을 보장하기 위한 필수적인 기술이다.

위성통신 시스템에서 항재밍 능력을 보유한 대표적인 통신방식은 주파수 도약 방식과 직접 확산 방식이 있다. 직접 확산 방식은 원래의 신호에 주파수가 높은 디지털 신호인 확산코드를 곱하여 확산시키는 대역 확산 변조방식으로 위성주파수 자원이 한정되어 있는 환경에서는 전력 효율이나 대역폭 효율 면에서 주파수 도약 방식보다 유리하다^{[2][3]}. 대역확산 통신 시스템은 고유의 처리 이득 때문에 상대적으로 간섭에 강인한 특성을 보이지만, 간섭 신호의 전력이 대역 확산으로 얻을 수 있는 처리 이득의 한계를 넘어서는 경우에는 성능 저하가 생기게 된다. 이런 경우 간섭 신호 제거를 위해 추가적인 방법이 필요하다. 간섭 신호를 제거하는 추가적인 방법으로 위성통신 시스템에서는 변환영역 처리 기법을 사용하는 것이 일반적이다^[4].

본 논문에서는 기존 변환영역 처리기법인 고속 푸리에 변환(fast fourier transform; FFT) 널링 기반 기법의 한계점을 극복하기 위하여 제안된 FFT 노치 필터 기반 기법^[5]을 하드웨어로 구현하고 수신품질, 초기 동기 획득 시간 및 톤 재밍 신호에 대한 항재밍 능력 관점에서 성능을 평가한다.

II. 본론

본 장에서는 기존 FFT 널링 기법을 설명하고 FFT 널링 기법의 한계점을 설명한다. 이 후, 본 논문에서 수행한 하드웨어 구현의 기반이 되는 [5]에서 제안한 FFT 노치필터 기반 기법을 간략히 설명한다.

2.1 FFT 널링 기반 기존 기법의 한계점

통신 시스템은 간섭이나 재밍 신호의 세기에 비례하여 수신품질이 좌우되며 기존의 확산 시스템만으로는 항재밍 성능을 만족할 수 없다. 항재밍 성능 향상을 위해 기존 연구에서 제안한 FFT 널링을 이용한 톤 재밍 제거 기법의 구조는 그림 1과 같다. FFT 널링 기법은 실시간으로 수신 신호의 스펙트럼을 감시하여 평균 전력 스펙트럼 밀도에 비해서 특정 협대역에 비정상적으로 큰 신호가 발생하면 톤 재밍 신호로 인식하고, 해당 주파수에 대한 정보를 저장하여 톤 재밍 널링(Tone Jammer Nulling) 블록으로 전달한다. 이후 N-point FFT를 통해 주파수 축의 신호로 변경된 수신 신호는 톤 재밍 널링 블록으로 전달된다. 톤 재밍 널링 블록에서는 검출된 재밍 신호의 주파수에 해당하는 위치의 값을 '0'으로 대체하게 되며 이 신호는 다시 고속 푸리에 역변환(inverse fast fourier transform; IFFT)을 수행한다. 최종적으로 재밍 신호가 제거된 신호는 수신 단으로 전달되어 수신 단에서는 복조를 진행한다. 항재밍 기법을 적용한 경우 재밍 신호가 제거되어 정상적으로 복조가 가능해진다. 하지만 기존 기법은 톤 재밍 신호가 FFT 주파수의 정수배에 인가될 때만을 가정한 것이기 때문에 재밍 신호가 소수배로 인가될 경우에는 항재밍 기법 적용 후에도 복조가 불가능하다^[5].

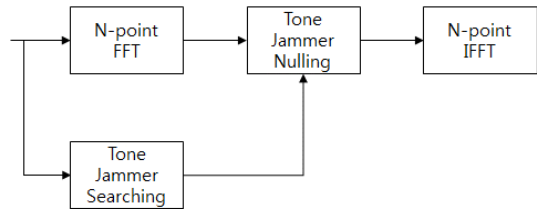


그림 1. FFT 널링 기반 항재밍 기법의 구조
Fig. 1. Structure of FFT nulling based anti-jamming scheme.

2.2 FFT 노치필터 기반 기법

기존 FFT 널링 기법은 톤 재밍 신호가 FFT 주파수의 정수배에 인가될 때만을 가정한 것이기 때문에 재밍 신호가 FFT의 소수배일 경우 항재밍 성능을 만족하지 못하게 된다. 재밍 신호의 주파수 영역 신호가 정확하게 한 구간에서만 발생하는 것이 아니라 주변 주파수에도 함께 발생하기 때문에 기존 기법에서는 인접 주파수 구간으로 확산된 재밍 신호에 대해서는 정상적으로 제거 할 수 없게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, [5]에서는 그림 2와 같이 측정된 재밍

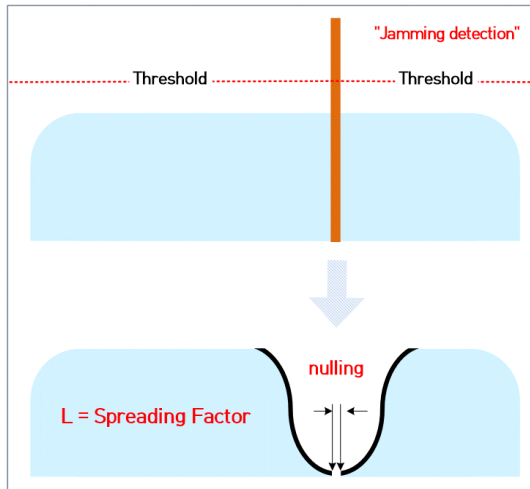


그림 2. 노치 필터 방식의 재밍 신호 제거 방법
Fig. 2. Jamming signal cancellation method of the notch filter based scheme.

위치 뿐 아니라 그 주변의 유효 신호도 함께 제거하여 성능을 향상시킬 수 있는 FFT 노치 필터 기반 항재밍 기법을 제안하였다.

그림 2에서 L은 확장 계수를 의미하며, FFT 구간 중 한 포인트의 재밍 신호가 인가되었을 때 L 포인트 넓이로 신호를 제거한다는 것을 의미한다. L이 너무 작을 경우 재밍 신호가 완벽히 제거되지 않으며, 너무 클 경우 같이 제거되는 유효 신호가 커지기 때문에 비트오류율(bit error rate; BER) 성능이 열화 되는 특성을 보인다. 따라서 시뮬레이션 통해 얻은 신호 대 잡음 비(signal to noise ratio; SNR) 성능이 우수한 L 값(=8)을 적용하였다. 제안하는 방법은 측정된 재밍 위치 뿐 아니라 그 주변의 유효 신호에 대해서도 노치 필터를 적용하여 신호를 제거하게 된다. 이러한 방법은 유효 신호에 왜곡을 발생시키지만 재밍 신호의 리플(Ripple)을 완화시켜 복조하고자 하는 유효 신호의 시간 축 특성을 안정화시킬 수 있다는 장점이 있다.

III. FFT 노치 필터 기법의 하드웨어 구현

3.1 하드웨어 적용 방안

3.1.1 FPGA 자원 관리

FFT 노치 필터 기반 항재밍 기법은 모뎀의 수신 단계에 적용된다. 기능 구현에 사용된 FPGA(Field-Programmable Gate Array) 칩셋은 Xilinx社의 Virtex 7 계열 xcv7585t-1157이며, 현재 모뎀 기능 구현에 이미 사용되고 있는 자원의 용량은 표 1과 같

표 1. 모뎀 FPGA 자원 사용 현황(Slice : 56.77%)
Table 1. Modem FPGA resource usage status(Slice : 56.77%)

Resource	Utilization	Available	Utilization(%)
FF	106859.0	728400.0	15
LUT	143655.0	364200.0	39
Memory LUT	12639.0	111000.0	11
I/O	145.0	600.0	24
BRAM	462.0	795.0	58
DSP48	668.0	1260.0	53
BUFG	7.0	32.0	22
MMCM	1.0	18.0	6

다. 표 1에서 FF는 Flip Flop, LUT는 Loop-Up Table, I/O는 Input/Output Interface, DSP48은 레지스터, BUFG는 Global Clock Buffer 및 MMCM은 Mixed Mode Clock Manager를 각각 의미한다.

항재밍 기능을 추가하여도 합성 이후 FPGA 칩셋 정상 동작을 위해 사용할 수 있는 Slice는 최대 70%를 초과하지 않도록 구현하여야 한다. 따라서 표 1을 고려하였을 때 항재밍 구현에 사용될 수 있는 Slice 자원은 FF 자원 94692, BRAM 자원 333 및 DSP 자원 592이다. 항재밍 기법 구현 시 가장 큰 자원이 소모되는 구간은 FFT/IFFT 구간이다. 항재밍 기법 적용을 위하여 Virtex IP Coregen에서 제공하는 FFT 블록들에 대한 분석을 진행하였다. 표 2 및 표 3과 같이 Virtex IP Coregen에서는 Pipeline, Radix-4, Radix2 및 Radix2-lite의 총 4가지 FFT 블록을 제공한다. 표 4 및 표 5는 N=4096 일 경우 FFT 구현에 필요한 FPGA 자원을 나타낸다. 기법 구현 시 자원 소모가 가장 적은 방법은 Radix-4를 사용하는 것으로 이때의 실제 자원 할당 양은 표 4 및 표 5와 같고, 이의 분석 결과를 통해 현재 가용한 범위에서 Radix-4로 구현 시 최대 4096의 FFT를 사용할 수 있음을 알 수 있다.

표 2. FFT 블록 구현 방법에 따른 자원 사용량(1채널 구현 시)
Table 2. Resource usage according to the FFT block implementation method(at the time of one channel implementation)

	1 channel implementation		
	LUT/FF	DSP	BRAM
Pipeline	6463	50	18
Radix-2	2387	5	9
Radix-2-lite	2256	3	9
Radix-4	3923	20	11

표 3. FFT 블록 구현 방법에 따른 자원 사용량(전체 구현 시)
Table 3. Resource usage according to the FFT block implementation method(at the time of full implementation)

	Resources for Full Implementation			
	# of required channels	LUF /FF	DSP	BRAM
Pipeline	4	25852	200	72
Radix-2	9	21483	54	73
Radix-2-lite	15	33840	72	97
Radix-4	4	15692	80	35

표 4. Radix-4 사용 시 항재밍 구현에 필요한 자원양 (FFT블록)
Table 4. Amount of resources required to implement anti-jamming when using Radix-4 (FFT block)

N	FFT Block Number	Anti Jamming Resource Usage		
		LUT/FF	DSP	BRAM
4096	4	16k	80	35
8192	4	17k	80	70

표 5. Radix-4 사용시 항재밍 구현에 필요한 자원양 (FFT/IFFT 블록)
Table 5. Amount of resources required to implement anti-jamming when using Radix-4 (FFT/IFFT block)

N	FFT Block Number	Anti Jamming Resource Usage (FFT/IFFT Block included)		
		LUT/FF	DSP	BRAM
4096	4	96k	480	210
8192	4	102k	480	420

3.1.2 지연시간(Latency)

위성통신체계는 지형적 제약을 크게 받지 않는다는 장점 때문에 다양한 육상, 해상, 공중에서의 지휘통신을 원하는 군 위성통신체계에 사용되어 왔다. 하지만 위성통신의 특성상 정지위성과의 거리로 인해 발생하는 지연시간이 약 250 ms이고 시스템 처리 지연시간이 거리로 인한 지연시간에 추가되기 때문에 무인기와 같이 지상에서 실시간으로 운용하여야 하는 시스템의 경우 지연시간을 최소화 할 필요가 있다. 기법 구현 시 최대 지연시간은 거리로 인한 지연시간 250 ms를 포함하여 총 400 ms를 넘지 않도록 한다.

표 6은 항재밍 기법 구현 전 기존에 개발된 모뎀의 지연시간을 나타낸다. 표 6에서 총 지연시간은 항재밍 기법 구현 이후에 만족시켜야 할 최종 지연시간이며, L대역 루프백 Round-trip은 모뎀이 70 MHz

표 6. 항재밍 기법 구현 전 Latency
Table 6. Latency before anti-jamming scheme implementation

	Time
Total Latency	400 ms
L Band Loop-back Round-trip	43 ms
Satellite Round-trip-delay	250 ms
Residual Latency	107 ms

IF(Intermediate Frequency) 주파수를 L대역으로 송신할 때 이 신호가 다시 IF 주파수로 변환되어 모뎀에서 복조될 때까지의 시간을 나타낸다. 위성 Round-trip-delay는 송신 신호가 위성을 경유하여 다시 지상까지 도달하는 시간으로 일반적인 정지궤도 위성 기준 250 ms로 계산한다. 이를 토대로 목표 지연시간을 만족하고자 할 경우 모뎀에서는 항재밍 기능을 총 107 ms 이내에 동작하도록 구현하여야 한다.

그림 3의 전체 항재밍 기법 구현 블록 중 가장 크게 지연시간에 영향을 미칠 수 있는 부분은 FFT/IFFT 변환 구간과 계산에 필요한 2개의 프레임 버퍼에 저장하는 부분이다. FFT 수행 시간은 0.357 ms 이며 구현에 필요한 2 프레임 지연 버퍼(0.640 ms)와 IFFT의 수행시간(0.357 ms)을 포함할 경우 항재밍으로 인한 총 지연시간은 1.35 ms로 예상된다. 따라서 Rxdix-4 FFT 블록을 사용할 경우 제안한 기법을 지연시간을 만족시키며 구현이 가능하다.

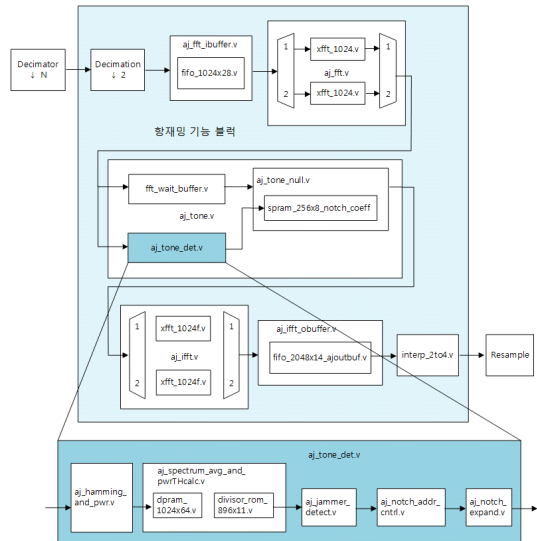


그림 3. 항재밍 기법 구현 블록도
Fig. 3. Block diagram of anti-jamming scheme implementation

3.2 노치필터 기반 항재밍 기법의 하드웨어 구현
 본 절에서는, [5]에서 제안한 노치필터 기반 항재밍 기법의 실제 하드웨어 구현을 위해 블록 다이어그램 기준으로 각각의 기능 및 구현방법에 대해 기술 한다. 제안하는 기법의 구현 블록도는 그림 3과 같고, 모델에 대한 자세한 제원 및 성능은 표 7과 같다. 그림 4는 항재밍 기능이 구현된 모델보드의 실형상이다. 개발된 모델보드는 무인항공기의 환경/전자기 간섭 규격인 MIL-STD-810G 및 MIL-STD-464C 기준을 적용하여 시험을 수행하였고 요구조건을 만족함을 확인하였다. 수신된 신호는 복조 구간 전 먼저 버퍼에 저장되어 재밍 신호의 존재 여부를 확인하고 재밍 신호 확인 시 노치 필터를 통해 재밍 신호를 제거하게 된다. 각 블록에 대응되는 내부 코드의 계층(hierarchy) 구조는 그림 5와 같고 각 블록 별 기능은 표 8과 같다.

표 7. 모델 제원 및 성능
 Table 7. Modem performance

Parameter	Value
FPGA Chipset	xcv7585t-1157
Modulation	QPSK/8PSK
Channel coding	LDPC/BCH (1/2, 3/4, 5/6)
Band Width	2 MHz~28 MHz

표 8. 구현 블록단위 기능
 Table 8. Implementation block unit function

File name	Explanation
aj.v	Anti-jamming Total Top Block, Decimation of Symbol Rate from 4fs to 2fs
aj_fft_ibuffer.v	Buffer that inputs decimated symbols (2fs) and outputs them in sysclk units
fifo_1024x28.v	FFT Input Buffer Memory
aj_fft.v	FFT to input and output to sysclk clock
aj_tone.v	Anti-jamming detection and removal top block
fft_wait_buffer.v	FFT buffer delaying by anti-jamming detection time
aj_tone_det.v	Anti-jamming detection top block
aj_hamming_and_pwr.v	After performing the FFT output Hamming window, calculate $\hat{2}$ power
aj_spectrum_avg_and_pwrTHcalc.v	Power average calculation and threshold calculation

dpram_1024x64.v	Memory to accumulate for each subcarrier of spectrum
divisor_rom_896x11.v	Store denominator in ROM instead of division and replace with multiplication
aj_jammer_detect.v	Anti-jamming position detection
aj_notch_addr_cntrl.v	Notch filter FFT index output for jamming removal
aj_notch_expand.v	Notch location extension
aj_tone_null.v	Anti-jamming top block
spram_256x8_notch_coeff	Memory for storing notch filter coefficients
aj_ifft.v	IFFT input/output in sysclk unit
aj_ifft_obuffer.v	A buffer that outputs sysclk IFFT output at the same symbol rate (2fs) as the aj_fft_ibuffer input
fifo_2048x14.v	FFT output buffer memory
interp_2to4.v	Upsample the symbol rate (2fs) to 4fs



그림 4. 항재밍 기법 구현을 위한 모델 보드
 Fig. 4. Modem board for anti-jamming scheme implementation

3.3 하드웨어 구현 결과

3.3.1 수신품질

그림 6은 제안한 항재밍 기법의 성능 평가를 위한 시험 구성도를 나타낸다. 그림 6에서 ADC는 Analog-to-Digital Converter를 의미하며 SA는 Spectrum Analyzer를 의미한다. 그림 7은 항재밍 기법 사용 유/무에 따른 모델 신호 경로를 나타낸다. 모델의 수신품질은 항재밍 기법 적용 유무와 재밍 신호의 인가 여부에 따라 달라지며 그림 8 및 그림 9에서 확인할 수 있다. 먼저 항재밍 기법을 적용할 경우 항재밍 기능 블록 내부의 고정소수점 FFT/IFFT 쌍 변환 과정 및 리샘플(Resample) 과정에서의 신호 누락으로

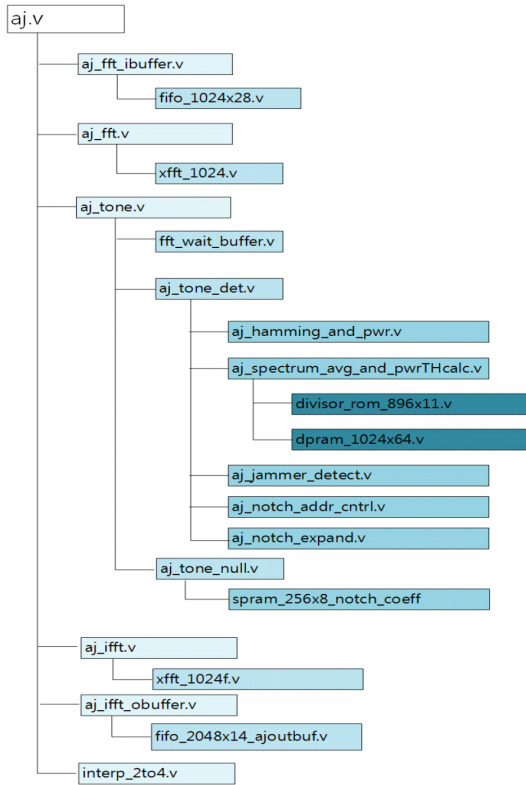


그림 5. 코드 계층 구조
Fig. 5. Code hierarchy

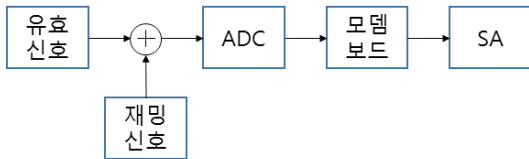


그림 6. 시험 구성도
Fig. 6. Block diagram for test

인해 항재밍 기법을 적용하지 않을 경우에 비해 수신 품질이 저하된다. 하지만 기존 모뎀의 경우 재밍 신호가 커질수록 재밍 신호에 대한 내성이 없어 정상적으로 동작하지 않게 됨을 고려했을 때 항재밍 기법 사용이 필요할 것으로 판단된다. 다음으로 기존 널링 기법과 제안하는 노치 기법의 SNR을 비교하였다. 시험에서 노치 계수는 15로 설정하였으며 JSR이 낮을 때 (JSR = -10 dB)와 높을 때(JSR = 20 dB)를 비교한 결과는 각각 그림 8 및 그림 9와 같다. 노치 계수는 시험을 통하여 재밍 신호 인가 시 계수를 8~16까지 가변시켜 가며 FER(Frame Error Rate)이 가장 우수한 값인 15로 선정하였다. JSR이 낮은 경우에는 기존 널

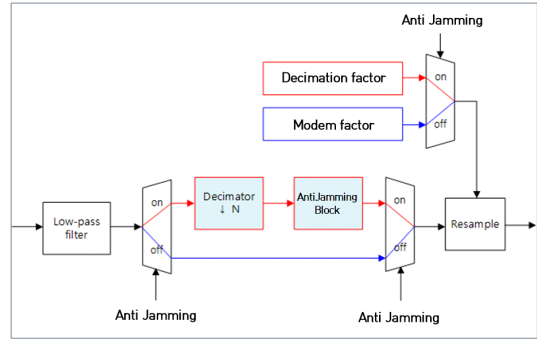


그림 7. 항재밍 기법 적용에 따른 모뎀 신호 경로
Fig. 7. Modem signal path according to anti-jamming scheme

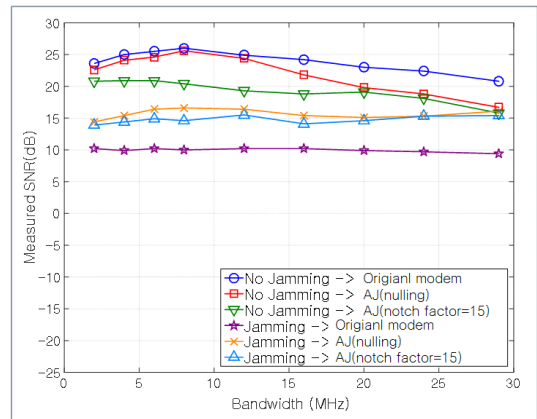


그림 8. 대역폭에 따른 수신품질(JSR=-10 dB)
Fig. 8 Receiving quality according to bandwidth(JSR=-10 dB)

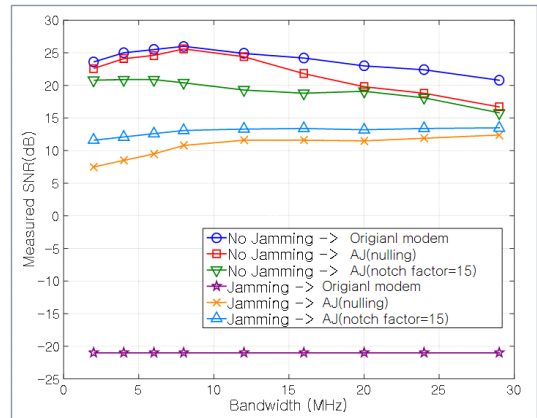


그림 9. 대역폭에 따른 수신품질(JSR=20 dB)
Fig. 9. Receiving quality according to bandwidth(JSR=20 dB)

링 기법보다 제안하는 노치 기법이 유효신호를 더 많이 제거하기 때문에 대역폭에 따라 1 dB 이내로 수신 품질이 낮거나 유사한 반면 JSR이 높은 경우 제거하

는 유효신호의 양보다 재밍 신호를 더 많이 제거하여 제한한 노치 기반 항재밍 기법의 성능이 더 우수함(대역폭과 상관없이 항상 SNR이 1~4 dB 높음)을 알 수 있었다.

3.3.2 초기 동기시간 획득

본 절에서는, 모뎀의 정상 동작을 위해 초기 동기 완료시간 목표를 1500 ms 미만으로 설정하여 구현한 후, 초기 동기시간의 변화에 대해 측정하였고 표 9에 시험 결과를 나타내었다. 일반적으로 대역폭이 낮아지면 프레임 수신 속도가 낮아지므로 동기 획득 시간이 증가하게 된다. 대역폭이 4 MHz일 때 모뎀의 수신 동기 시간은 평균 84 ms 정도를 나타내어 목표 동기 시간 내에서 모뎀의 동기가 이루어짐을 알 수 있었다. 따라서 항재밍 기법 적용 후에도 초기 동기시간 획득 면에서 시스템에 주는 영향성은 미비하다고 판단된다. 그러나 대역폭이 4 MHz 및 8 MHz일 때 일부 시나리오에서 재밍 신호로 인한 최대 모뎀 동기 시간이 각각 1618 ms 및 3545 ms로 측정되어 목표 동기시간을 초과하는 결과를 나타내었다. 따라서 향후 연구에서는 대역폭이 4 MHz 및 8 MHz일 때 모뎀의 초기 목표 동기시간 미 충족 구간에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

표 9. 항재밍 기법을 포함한 모뎀 초기동작 시간
Table 9. Modem initial operation time including anti-jamming scheme

Bandwidth (Hz)	Bandwidth ratio of wanted signal to 2 MHz subband jamming(%)	Average initial synchronization time(ms)	
		w/o anti jamming	w/ anti jamming
29 M	6.8	9	11 (worst : 222)
27 M	7.4	10	12 (worst : 351)
25 M	8.0	11	13
16 M	12.5	15	21
8 M	25.0	39	43 (worst : 1618)
4 M	50.0	75	84 (worst : 3545)

3.3.3 톤재밍 신호에 대한 항재밍 성능 시험

본 절에서는, 톤 재밍 시험을 위해 신호 발생기 (signal generator; SG)를 사용하여 기존 모뎀 신호에 재밍 신호를 인가하여 시험을 수행하였다. 그림 10은 실제 시험에서 사용된 톤 재밍 신호 및 유효 신호 스펙트럼을 확인한 결과를 나타내고, 그림 11은 톤 재밍 신호의 크기가 증가함에 따른 SNR 성능에 대한 LLS(Link Level Simulation) 결과와 보드 테스트 비교시험 결과를 나타낸다. 그림 11에서 SQI는 Signal Quality Indicator를 의미하며 SNR을 의미한다. LLS 결과 JSR -20 dB에서 +30 dB까지의 신호에 대해서 검출 및 제거가 가능함을 확인하였다. 모의실험 결과와 보드테스트 결과의 차이가 발생하는 이유는 양자화 오류로 인한 아날로그-디지털 변환기(analog to digital converter; ADC)의 유효비트 수의 감소와 증폭기의 비선형 특성 때문

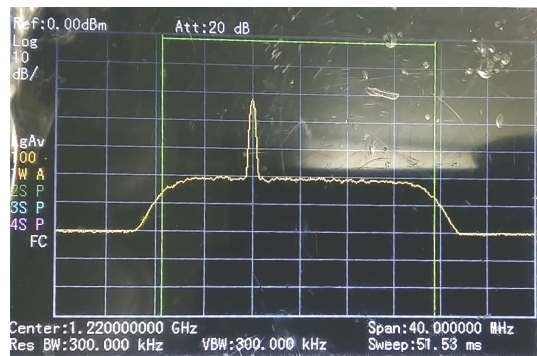


그림 10. 톤 재밍 신호 및 유효 신호 스펙트럼
Fig. 10. Tone jamming signal and valid signal spectrum

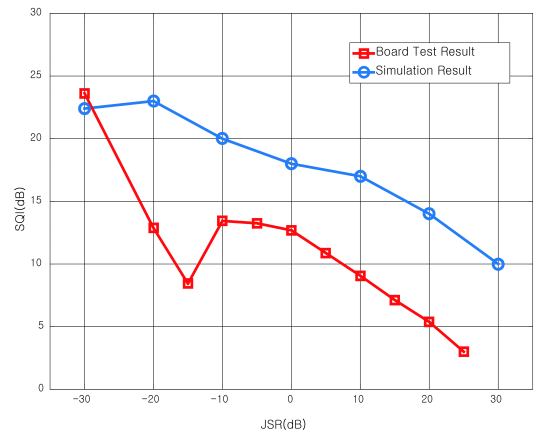


그림 11. 톤 재밍 신호 크기에 따른 SNR 성능
Fig. 11. SNR performance according to tone jamming signal size

이다. SIR -15 dB 이하에서는 톤 재밍 신호 검출에 실패하여 톤 신호로 인한 열화가 발생하여 SNR -10 dB에서 -15 dB 구간의 경우 톤 신호가 더 커짐에도 불구하고 SNR이 향상됨을 알 수 있다.

IV. 결 론

무인기 기술이 발달하고 무인기의 활동/작전 반경이 넓어짐에 따라, 데이터링크의 신뢰성을 확보하기 위하여 지상통제장비와 무인기와의 가시선통신이 불가하거나 비 가시선 영역에서 위성데이터링크는 필수적이다. 그러나 개방된 전송 채널을 사용하는 위성통신의 특성상 적에 의한 의도적인 재밍 환경에 쉽게 노출 될 수 있다는 단점이 있다. 본 논문에서는 위성데이터링크의 항재밍 성능을 향상시키기 위하여 기존에 [5]에서 제안한 FFT 노치 필터 기반 항재밍 기법의 하드웨어 구현을 수행하였고, 수신품질, 초기 동기 획득 시간, 톤 재밍 신호에 대한 항재밍 성능 관점에서 모의 실험 및 성능 시험을 수행하였다. 시험 수행 결과, JSR이 낮은 경우에는 기존 널링 기법보다 제안하는 노치 기법이 유효신호를 더 많이 제거하기 때문에 대역폭에 따라 1 dB 이내로 수신품질이 낮거나 유사한 반면, JSR이 높은 경우 제거하는 유효신호의 양보다 재밍 신호를 더 많이 제거하여 제안한 노치기반 항재밍 기법의 성능이 더 우수함을 알 수 있었다. 다음으로 모뎀의 수신 동기 성능이 가장 좋지 않은 시나리오(대역폭이 4 MHz)에서 수신 동기 시간은 평균 84 ms 정도를 나타내어 목표 동기 시간 내에서 모뎀의 동기가 이루어짐을 알 수 있었다. 따라서 항재밍 기법 적용 후에도 초기 동기시간 획득 면에서 시스템에 주는 영향성은 미비하다고 판단할 수 있다. 또한 항재밍 능력 분석을 위한 LLS 결과 SIR -20 dB에서 +30 dB까지의 신호에 대해서 검출이 가능하였으나 하드웨어 구현 후 -10 dB에서 25 dB까지의 톤 신호에 대한 검출 및 제거가 가능함을 확인하였다.

결론적으로 무인기-위성 간 데이터링크 시스템에 FFT 노치 필터 기반 항재밍 기법을 적용한다면 좀 더 효율적인 재밍 신호의 검출 및 제거가 가능하므로 위성데이터링크의 생존성 및 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대되며, 향후 국방기술기획, 선행연구 핵심기술 선정 및 국방기술동향 연구에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] Y. C. Jung, "Network-centric warfare's core elements, satellite communication system," *Defense Agency for Technol. and Quality Organ*, vol. 12, pp. 12-14, 2009.
- [2] C. H. Lee, S. J. Jo, and J. H. Ryu, "Performance analysis of follower noise jamming considering tracking parameters against frequency hopping signals," *J. KIMST*, vol. 11, no. 3, pp. 67-75, 2008.
- [3] J. M. Gim and C. S. Eun, "Design and development of DSSS modem for UAV uplink," *J. IEIE*, vol. 46, no. 8, pp. 1-9, Aug. 2009.
- [4] C. Y. Lee, J. H. Jun, S. H. Lee, H. G. Seo, H. S. Ko, and J. H. Han, "Design and implementation of interference rejection function using digital satellite transponder," *J. KICS*, vol. 39C, pp. 36-44, 2014.
- [5] S. H. Park and J. R. Cha, "Anti-Jamming scheme based on FFT notch filter to enhance the survivability of a satellite communication," *J. IEIE*, vol. 55, no. 5, pp. 567-574, May 2018.

박 서 현 (Seohyun Park)



2008년 2월 : 충남대학교 전자전
파정보통신공학과 학사 졸업
2017년 2월 : 충남대학교 전자정
보통신공학과 석사 졸업.
2014년~2019년 : 국방과학연구
소 연구원
2019년~현재 : 국방기술품질원

(방위산업기술진흥연구원)

<관심분야> 통신, 신호처리, 위성 데이터링크, 위성통신시스템, 항공, 국방기술기획

[ORCID:0000-0002-5899-7072]

차 재 룡 (Jaeryong Cha)



2004년 2월 : 아주대학교 전자공
학과 학사 졸업

2006년 2월 : 아주대학교 전자공
학과 석사 졸업

2013년 2월 : 아주대학교 전자공
학과 박사 졸업

2013년~현재 : 국방과학연구소
선임연구원

<관심분야> RFID, 네트워크 코딩, 무선 네트워크
(WLAN, WMN, MANET), 무선망 QoS, 위성테이
터링크, 위성통신시스템 등

[ORCID:0000-0001-8279-0779]