

재밍 환경에 따른 STAP 및 SFAP 방식 성능 분석

김기윤*

Performance Analysis of STAP and SFAP in Jamming Environments

Kiyun Kim*, Regular Member

요 약

본 논문에서는 적응형 배열 안테나에 적용되는 대표적 항재밍 기술로 알려진 STAP 및 SFAP 신호처리 방식의 시뮬레이션 성능을 비교 분석하였다. 시뮬레이션을 위해 두 방식의 가중 벡터(weighting vector)를 추정하는 방법으로 공통적으로 MMSE(Minimum Mean Square Error) 알고리즘을 사용하여 다양한 재밍환경에서 시뮬레이션을 통한 성능을 제시하였다. 특히, 재밍 전력 J/S(Jamming to Signal Power Ratio)에 따른 STAP 및 SFAP 성능 비교 분석, 신호대역에 대한 재밍 대역의 비율에 따른 성능 비교 분석 및 두 방식간 BER 성능을 비교하여 재밍 환경에 따른 항재밍 성능을 분석하였다.

Key Words : Anti-jamming, STAP(Space Time Adaptive Processing), SFAP(Space Frequency Adaptive Processing), J/S(Jamming to Signal Power Ratio), Jamming Pattern, Array Antenna

ABSTRACT

In this paper, a comparative studies on the STAP and SFAP were performed, which are known as representative anti-jamming technology for adaptive array antenna. As a method of estimating the weighting vector for simulation, MMSE(Minimum Mean Square Error) algorithm was commonly used and the analyses of the simulation performance in various jamming environments were presented. Especially, performance comparison between STAP and SFAP according to the jamming power J/S(Jamming to Signal Power Ratio), performance comparison in the ratio of jamming bandwidth to signal bandwidth, and performance comparison of BER between STAP and SFAP were presented.

I. 서 론

위성항법시스템(satellite navigation system)은 군사 및 민간 목적으로 다양한 응용분야에서 적극적으로 활용되고 있고, 따라서 많은 나라들이 유사시 운용의 종속화를 방지하고자 독자적으로 위성을 발사하여 위성 항법 시스템을 구축하고 있다[1]. 그러나 위성항법시스템은 기본적으로 지구 밖 2만 Km 상공에서 신호를 송신하여 수신 신호 감도(received signal sensitivity)가 매우 약하므로, 적의를 가진 상대가 의도적으로 위성항법 신호 수신을 방해할 목적으로 재밍 신호(jamming signal)를 송신할 경우 위성항법시스템은 쉽게 무력화될 수 밖에 없다[2]. 이를 극복하기 위해 다양한 항재밍(anti-jamming) 기술이 체계적으로 개발되고 있는데, 대표적인 항재밍 기술로 적응형 배열 안테나를 이용한 빔포밍(beam forming) 및 널링(nulling)을 수행하는 방식이 있다.

아울러 이 기술은 시간 영역 및 주파수 영역에서의 신호처리를 조합하여 성능 개선을 이룰 수가 있는데 STAP(Space Time Adaptive Processing) 및 SFAP(Space Frequency Adaptive Processing) 기술이 대표적이다[3~7].

본 논문에서는 STAP 및 SFAP 기술에 가중 벡터 계수(weighting vector coefficient) 추정을 위해 널리 활용되는 MMSE(Minimum Mean Square Error) 기법을 기반으로 다양한 재밍 환경에서 성능 비교 분석을 수행하였다.

먼저 II장에서는 STAP 및 SFAP 방식의 구조 및 특징을 소개하고 MMSE 가중 벡터 계수 추정 방법을 기술하였다. 아울러 III장에서는 STAP 및 SFAP 방식을 재밍 전력에 따른 성능 비교 및 재밍 대역폭에 따른 성능 비교를 수행하고 두 방식간 BER 성능을 비교 분석하였다. 아울러 IV장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

*명지전문대학 공학정보학부 전기과 (kkim@mjc.ac.kr)

접수일자 : 2015년 11월 30일, 수정완료일자 : 2015년 12월 18일, 최종게재확정일자 : 2015년 12월 24일

II. STAP 및 SFAP 방식의 가중 계수 추정

1. STAP 방식 구조 및 가중 벡터 추정

STAP(Space Time Adaptive Processing) 방식은 적응형 어레이 안테나에 유입된 신호를 각 어레이 별로 디지털 신호 처리하여 FIR(Finite Impulse Response) 필터 형태로 구성하여 재밍 신호를 제거하는 방식이다[5,8]. 그림 1에 보인 바와 같이 각 어레이 안테나의 FIR 필터 계수들은 어레이 안테나에 입력되는 공간적인 신호들과 FIR 필터의 탭지연 선(tapped delay line)에 대한 시간적인 신호들의 조합인 공간 시간 신호 벡터(space time signal vector) 성분을 가지게 되며, 이를 바탕으로 가중 벡터(weighting vector)를 추정하게 된다. 추정된 가중 벡터는 각 어레이 안테나의 트랜스버설(transversal) FIR 필터 계수로서 수신 신호내 존재하는 재밍 신호 성분을 제거한다. 본 논문에서는 가중 벡터 추정 방식으로 널리 알려진 기법인 MMSE(Minimum Mean Square Error) 방식을 STAP 방식에 적용하고 시뮬레이션을 수행하였다.

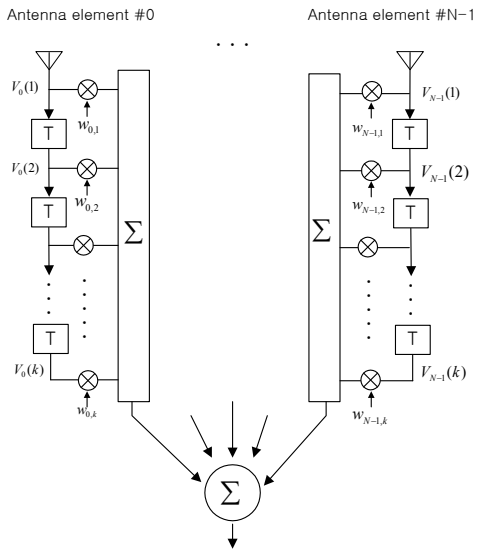


그림 1. STAP 방식 구조

최적의 가중 계수는 원하는 순시(temporal) 신호 \$s_d\$와 어레이 안테나 출력 신호 \$W^T V\$ 사이의 평균 제곱 오차(mean square error)를 최소화하는 가중 계수 \$W\$이다. 즉 식 (1)을 최소화하는 \$W\$이다.

$$\begin{aligned} \epsilon &= \langle |s_d - W^T V|^2 \rangle \\ &= \langle s_d s_d^* \rangle - W^T \langle V s_d^* \rangle - W^H \langle V s_d^* \rangle + W^H \langle V^* V^T \rangle W \end{aligned} \quad (1)$$

따라서, MMSE 추정 기법을 적용한 STAP 방식의 최종 가중 계수는 식 (2)와 같다.

$$W = R^{-1} g_s \quad (2)$$

여기서, \$R = E[VV^H]\$, \$g_s = \langle V^* S_d \rangle\$ 를 의미한다.

2. SFAP 방식 구조 및 가중 벡터 추정

STAP 방식은 적응형 어레이 안테나 각각에 유입된 신호를 디지털화 후 FIR 필터를 이용하여 재밍 신호를 제거하는 방식인데 비해 SFAP(Space Frequency Adaptive Processing) 방식은 각 어레이 안테나에 FFT(Fast Fourier Transform) 및 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 이용하여 주파수 영역에서 가중 벡터를 추정하여 신호내 존재하는 재밍 신호 성분을 제거한다[9]. 그림 2에 보인 바와 같이 각 어레이 안테나에서 디지털 샘플된 신호들은 FFT 사이즈만큼 저장하였다가 FFT 신호처리를 수행하여 시간영역의 신호를 주파수 영역의 신호로 변환한다. 이러한 과정은 모든 어레이 안테나마다 수행되어 공간적인 신호들을 조합하게 되어 공간 주파수 신호 벡터(space frequency signal vector)를 가지게 된다. 이와 같은 방법으로 추정된 가중 벡터는 각 주파수 빈(frequency bin)의 계수로서 적용되어 재밍 신호 성분을 제거한다.

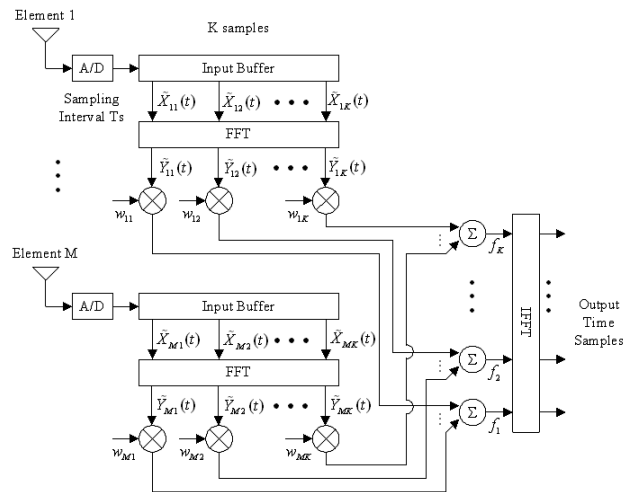


그림 2. SFAP 방식 구조

SFAP 방식의 가중 계수 추정 방식으로 널리 알려진 기법으로는 STAP 방식과 마찬가지로 MMSE 방식이 있으며, 본 논문에서는 STAP과의 성능 비교를 위하여 MMSE 방식을 이용한 가중 계수를 추정하고 SFAP 방식에 대한 성능 평가를 수행하였다.

각각의 어레이 안테나에 수신된 신호의 디지털 샘플화된 신호 벡터를 FFT 변환 이후, 신호 벡터를 식 (3)으로 나타내면, FFT 변환된 수신 신호 벡터에 대한 공분산 행렬(covariance matrix) \$\Phi_y\$ 와 FFT 변환된 수신 신호 벡터와 요

구되는 신호(desired signal) $\tilde{r}(t)$ 와의 상관 행렬(correlation matrix) S_y 는 각각 식 (4) 및 (5)와 같다.

$$Y(t) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_{11}(t) & \tilde{y}_{12}(t) & \cdots & \tilde{y}_{1K}(t) \\ \tilde{y}_{21}(t) & \tilde{y}_{22}(t) & \cdots & \tilde{y}_{2K}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{y}_{M1}(t) & \tilde{y}_{M2}(t) & \cdots & \tilde{y}_{MK}(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\Phi_y = E[Y(t)^* Y(t)^T] \quad (4)$$

$$S_y = E[Y(t)^* \tilde{r}(t)] \quad (5)$$

SFAP의 가중 계수는 식 (4)와 (5)를 이용하여 식 (6)과 같이 계산된다.

$$W = \Phi_y^{-1} S_y \quad (6)$$

III. STAP 및 SFAP의 성능비교

표 1은 본 논문의 STAP 및 SFAP 성능비교 시뮬레이션을 위한 파라미터를 나타내었다. STAP 방식과 SFAP 방식의 성능 비교에 적용된 안테나는 균일 선형 어레이 안테나(uniform linear array antenna)를 모델링하여 적용하였다.

표 1. 시뮬레이션 기본 파라미터

Parameters	Value
Chip Rate	1.023 [Mcps]
PRN Code	C/A code
Modulation	BPSK
Sample Rate	16 [samples/chip]
Spreading Factor	1023
Antenna Array	Uniform Linear Array
Length of Inter-element Spacing	$\lambda/2$
# of antenna Array	2, 4
# of tap	STAP : 4, SFAP : 4,16
Jamming Power(J/S)	-10~40 [dB]
Weight vector estimation algorithm	MMSE

1. 재밍 전력에 따른 성능 비교 분석

그림 3은 J/S(Jamming to Signal Power Ratio)가 -10dB, 0dB, -10dB으로 재밍 전력(jamming power) 증가에 따른 2개의 안테나(4 Tap) STAP 방식, 2개의 안테나(4 FFT) 그리고 2개의 안테나(16 FFT)의 SFAP 방식간의 성능을 나타낸 것이다. 여기서 고려된 재밍 대역폭(BW; bandwidth)은 신호 대역폭에 대한 재밍 대역폭의 비율(Jamming BW / Signal BW)으로써, 0, 0.0626, 0.3125, 0.5625, 0.8125로 시뮬레이션 하였다.

재밍 전력이 J/S = 0dB 이하에서는 모든 재밍 대역폭에

대하여 2개의 안테나(4 Tap)의 STAP 방식의 성능이 2개의 안테나(4 FFT)의 SFAP 방식의 성능보다 우수하다. 즉, SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio)가 작다. 그러나 재밍 전력 J/S = 0dB 이상이 되면, STAP 방식의 경우 성능이 급격히 열화되는 반면에 SFAP 방식의 성능은 STAP 만큼 급격히 열화되지는 않는다. 이와 같은 이유는 SFAP 방식은 주파수 대역에서 신호처리가 이루어지므로 재밍 신호가 존재하는 주파수 대역 성분을 상대적으로 원활히 제거하기 때문에 재밍 전력 크기 변화에 민감하지 않은 반면, STAP 방식은 시간 영역에서 재밍 신호를 제거하기 때문에 재밍 전력이 클 경우 수신 신호 상태가 매우 열화되므로 전력에 민감한 특성을 나타내기 때문으로 분석된다.

톤(tone) 재밍의 경우는 신호 대역폭에 대한 재밍 대역폭의 비율 = 0인 경우로 해석될 수 있으며, STAP 방식은 재밍 전력에 상관없이 거의 일정한 성능을 보이는데 반해 2개의 안테나(4 FFT)의 SFAP 방식은 톤 재밍 신호를 추정하기에는 해상도(resolution)가 부족하기 때문에 성능 열화를 보이는 것으로 분석된다.

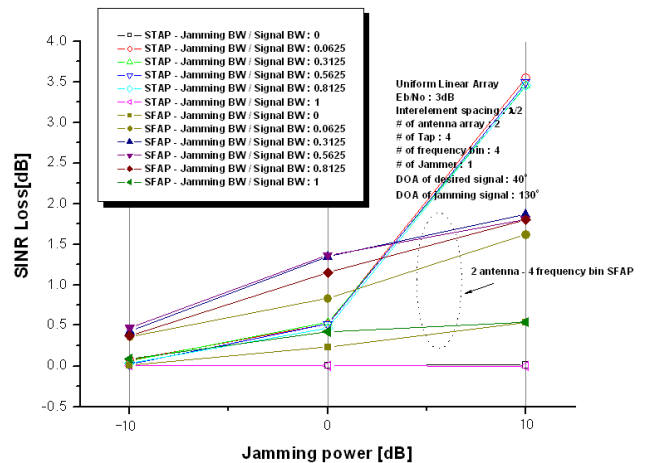


그림 3. 재밍 전력에 따른 성능평가

2. 재밍 대역폭에 따른 성능 비교 분석

톤 재밍(Jamming BW / Signal BW = 0)부터 광대역 재밍(Jamming BW / Signal BW = 1)까지 재밍 신호의 대역폭을 변화시키면서 2개의 안테나(4 Tap) STAP 방식, 2개의 안테나(4 FFT) 그리고 2개의 안테나(16 FFT)의 SFAP 방식의 SFAP 방식에 대하여 성능 비교를 수행하였다. 이때 Eb/No는 3dB로 설정하였으며, 고려된 재밍 전력 J/S = 0dB 및 10dB이다.

그림 4(a)는 J/S=0 dB인 경우의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 협대역 및 광대역 재밍 신호가 톤 재밍 신호보다 큰 성능 열화를 유발함을 확인할 수 있으며, 2개의 안테나(4 Tap)의 STAP 방식의 성능이 2개의 안테나(4 FFT)과 2개의 안테나(16 FFT)의 SFAP 성

능보다 우수함을 확인할 수 있다. 또한 SFAP 방식에서 2 개의 안테나(4 FFT) 및 2 개의 안테나(16 FFT)의 성능 비교 시에는 2 개의 안테나(16 FFT)의 성능이 2 개의 안테나(4 FFT)의 SFAP 방식의 성능보다 다소 우수하다.

그림 4(b)의 J/S = 10dB의 재밍 전력이 인가될 경우는 그림 4(a)의 J/S = 0dB 와 달리 2 개의 안테나(4 Tap)의 STAP 방식의 성능이 2 개의 안테나(4 FFT) 및 2 개의 안테나(16 FFT)의 성능보다 열화되는 성능을 보임을 확인할 수 있다. 이는 앞서 재밍 전력에 따라 분석한 결과와 마찬가지로 재밍 전력 증가시 SFAP 방식은 재밍 신호가 존재하는 주파수 대역의 재밍 신호를 완전히 제거하기 때문에 재밍 전력에 덜 민감한 반면 STAP 방식은 시간 영역에서 재밍 신호를 제거하기 때문에 재밍 전력에 민감한 특성을 보이기 때문이다. 또한 SFAP 방식에서 2 개의 안테나(4 FFT) 및 2 개의 안테나(16 FFT)의 성능 비교 시에는 2 개의 안테나(16 FFT)의 성능과 2 개의 안테나(4 FFT)방식의 성능은 거의 비슷한 성능을 나타낸다.

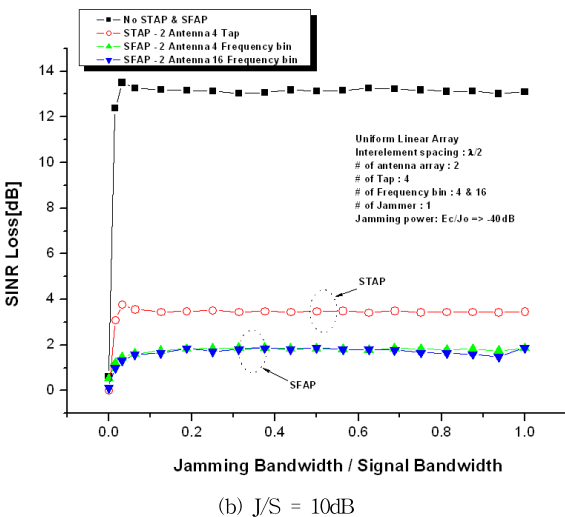
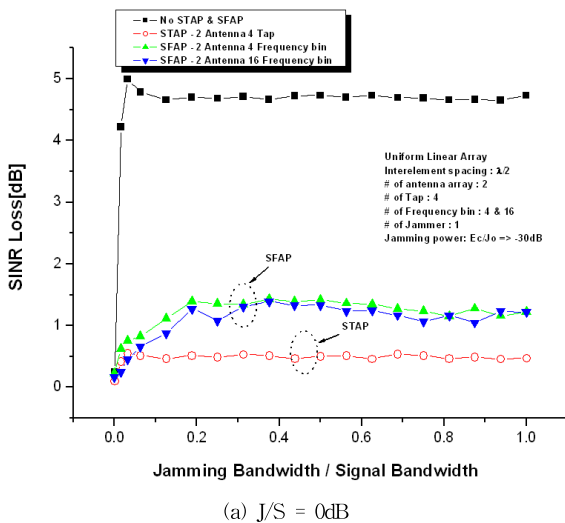


그림 4. 재밍 대역폭에 따른 성능

3. BER 성능 비교 분석

STAP 과 SFAP 방식 중 재밍 전력 대응 효과를 분석하기 위한 성능 비교로서 4 개의 안테나(4 tap)의 STAP 방식과 4 개의 안테나(16 FFT)의 SFAP에 대한 BER(Bit Error Rate) 성능 비교를 수행하였다. 여기서, 재밍의 종류는 광대역 재밍으로 수행하였으며, 재밍 전력은 J/S 기준으로 0dB ~ 40dB (E_c/J_o -30dB ~ -70dB)가 고려되었다.

그림 5(a)는 광대역 재밍 신호 존재 시 4 개의 안테나(4 tap)의 STAP 방식의 경우 J/S(또는 E_c/J_o)에 따른 성능을 나타낸 것이다. J/S = 10dB(E_c/J_o =-40dB) 까지는 재밍 신호 제거 효과에 의해 항재밍(anti-jamming) 신호처리를 적용하지 않은 성능과 비교해 큰 성능 향상을 보이지만, STAP 방식은 재밍 전력이 커질수록 재밍 신호의 제거 효과가 줄어들게 되며, 이에 따라 성능이 열화된다. 특히, J/S = 20dB(E_c/J_o =-50dB) 이상에서는 재밍 신호의 영향으로 큰 성능 열화를 보임을 확인할 수 있다.

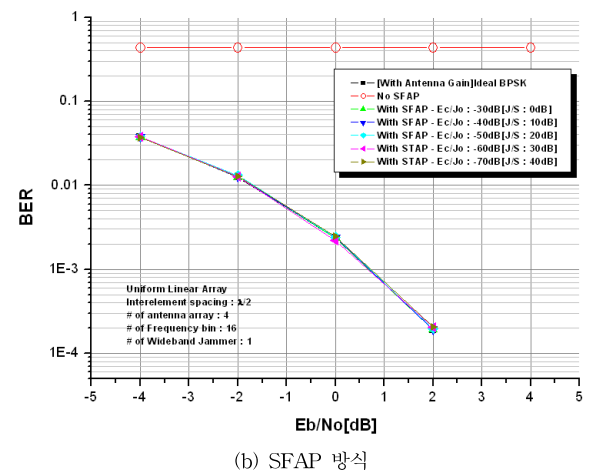
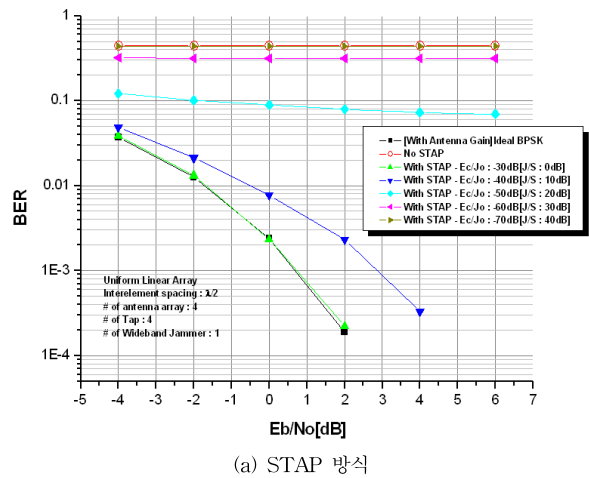


그림 5. 광대역 재밍 고려 시의 성능 비교

그림 5(b)는 4 개의 안테나(16 FFT)의 SFAP 방식 성능을 나타낸 것이다. 광대역 재밍 신호 존재 시 4 개의 안테나(16 FFT)의 SFAP 방식은 모두 재밍 신호 제거 효과에 의해 항재밍 신호처리를 적용하지 않은 성능과 비교해 큰 성능 향상

을 보이며, 이상적인 성능과 거의 유사한 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 즉, 광대역 재밍 신호 존재 시 SFAP 방식은 STAP 방식보다 더 큰 재밍 전력에 효과적으로 대응할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 적응형 배열 안테나에 적용되는 대표적 항재밍 기술로 알려진 STAP 및 SFAP 신호처리 방식의 성능을 다양한 재밍 환경에서 비교 분석하였다. 재밍 전력 J/S에 따른 STAP 및 SFAP 성능 비교 분석에서는 J/S 가 어느 특정 값 이상으로 커지면 STAP 방식의 경우 성능이 급격히 열화되는 반면에 SFAP 방식의 성능은 STAP 만큼 급격히 열화되지는 않았다. 신호대역에 대한 재밍 대역의 비율에 따른 성능 비교에서는 협대역 및 광대역 재밍 신호가 톤 재밍 신호보다 큰 성능 열화를 유발함을 확인할 수 있으며, 재밍 전력 및 FFT 크기에 따라 성능 차이가 있었다. STAP과 SFAP은 공분산을 구하기 위한 연산량이 달라 구현에 따르는 비용과 기술적 구현 난이도가 다르므로 STAP 및 SFAP 선정시 이를 고려할 필요가 있다. 아울러 안테나의 구조와 가중 벡터 계수를 추정하는 알고리즘에 따라 STAP 및 SFAP 방식의 성능은 달라지게 되므로 재머수, 재밍 신호 형태, 재밍 전력 등의 재밍환경에 따른 신호처리 방식 선정이 신중히 검토될 필요가 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 조중현, 임홍서, 최영준, 최진, "미래 한국형 위성항법시스템의 궤도와 지상기반 광학추적에 대한 연구", 통신위성우주산업연구회논문지, 제7권 3호, pp. 121-129, 2012. 12.
- [2] 송유찬, 황유민, 박지호, 김진영, 신요안, "부채널화를 통한 효율적인 부분대역 재밍 회피 알고리즘과 성능분석", 한국위성정보통신학회논문지, 제10권 2호, pp. 14-18, 2015. 6.
- [3] 김기윤, "위성항법시스템을 위한 항재밍 기술 분석", 한국통신학회논문지, 제 38권 12호, pp. 1216-1227, 2013. 12.
- [4] 한정수, 김기윤, 김석중, 김현도, 최형진, "Anti-Jamming GPS 시스템을 위한 적응형 디지털 신호처리에 관한 분석", 한국통신학회논문지, 제32권 8호, pp. 745-757, 2007. 8.
- [5] Fante, R. L. and Vaccaro, J. J, "WideBand cancellation of interference in a GPS receive array," IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, vol. 36, Issue. 2, pp. 549-564, April 2000.
- [6] Reed, C. W., Van Wechel, R., Johnston, I, Baeder, B., Hogan, E., "FaSTAPTM : A scalable anti-jam architecture for GPS," 2004 Position Location and Navigation Symposium(PLANS), PLANS 26-29, pp. 496 - 502, April 2004.
- [7] Elliot Kaplan and Kristopher Hegarty, Understanding GPS:

Principles and Applications, 2nd Edition, Artech House, 2005.

- [8] William L. M, "A STAP overview," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol 19, Issue 1, Part 2, pp. 19 - 35, Jan. 2004.
- [9] Inder J. G. and Thomas D. M, "Space-frequency adaptive processing(SFAP) for radio frequency interference mitigation in spread-spectrum receivers," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 52, no. 6, June 2004.

저자

김 기 윤(Kim, Ki Yun)

정회원



· 2002년 2월 : 성균관대학교 전기전자 컴퓨터 공학과 공학박사

· 2007년 6월 : 미국 Univ. of California, Los Angeles(UCLA) Post-doctor.

· 2008년 2월 : 삼성탈레스 기술연구소 책임연구원

· 2008년 3월 ~ 현재 : 명지전문대학 공학·정보학부 전기과 부교수

<관심분야> : 통신/영상 신호처리, 군통신, 이동통신, 의용공학 시스템 등