

제한된 피드백 상황에서의 항재밍을 위한 전략적 빔형성

임 성 호*, 한 성 민*,
이 재 석**, 최 지 웅^o

Tactical Beamforming for Anti-Jamming Under Limited Feedback

Sung-Ho Lim*, Sungmin Han*,
Jaeseok Lee**, Ji-Woong Choi^o

요 약

다중안테나를 이용한 빔형성 기반의 항재밍 기술은 수신빔형성을 통해 재밍신호는 상쇄간섭이, 정보신호는 보강간섭이 발생하게 하여 항재밍 이득을 얻는다. 하지만 채널상황에 따라 형성된 빔의 부엽이 커지거나, 주엽의 선택도가 저하되어 재밍신호의 상쇄가 충분하게 이루어지지 않을 수 있다. 이를 해결하기 위해 송신단에서 서로 다른 주파수를 사용하는 정보신호와 유도신호를 각각 수신단과 재머로 빔형성하여 재머가 유도신호에 재밍전력을 분배하도록 할 수 있다. 본 논문에서는 송신 빔형성시 필요한 제한된 피드백 정보로 빔형성이 가능한 기법을 제안하고자 한다. 시뮬레이션을 통해 피드백 정보가 존재하는 상황과 비교하여 본 제안기법의 유효성을 검토한다.

Key Words : Antij-jamming, Beamforming, MIMO(Multiple-input multiple-output), SJNR(Signal-to-jamming-plus-noise power ratio), SLR(Signal-to-leakage power ratio)

ABSTRACT

Array beamforming for anti-jamming means that jamming signals are superposed destructively, while superposing information signals constructively at a receiver. However, according to channel state variation, the anti-jamming performance of the beamforming can be degraded because of large beamwidth of the sidelobe and lower selectivity of the mainlobe. To mitigate this problem, we introduce a beamformed decoy signal which uses frequency band distinguished from the information signal to make the jammer concentrate its jamming power to a wrong target under limited feedback. In this paper, we show that the performance of the proposed scheme can approach that of optimal one with perfect feedback.

I. 서 론

유선에서 무선으로 통신환경이 변화하고 상위계층에서의 보안을 위한 오버헤드가 커짐에 따라 물리계층에서의 보안 연구가 대두되고 있다. 특히 재밍공격은 전자전에서 적군의 군통신망 단절을 위해 전술적으로 활용될 수 있으며^[1,3], 민수산업의 측면에서는 셀룰러 기반의 이동통신 환경에도 큰 위협이 되고 있다.

이러한 재밍에 대응하기 위한 대표적인 항재밍 기술로 DSSS(Direct sequence spread spectrum)과 FHSS(Frequency hopping spread spectrum)이 있다. DSSS는 확산코드를 이용하여 정보신호의 전력을 넓은 대역폭으로 확산시켜 잡음전력 아래로 떨어트림으로서 협대역 재밍 공격을 방지하는 효과가 있다. FHSS는 특정 시간주기로 정보신호가 사용하는 주파수 대역을 바꾸어 특정한 대역을 공격하는 재머로부터 공격 피해를 시간적으로 확산시킬 수 있다. 이렇게 함으로써 추가적인 인터리빙과 채널부호화만으로 항재밍이 가능하게 된다.

과거의 2세대 및 3세대 통신방식의 핵심이었던 스펙트럼 확산 방식 기반의 기술들은 차세대 통신을 위한 보안기법에 적용되기 어렵다. 이에 따라 최근 다중

* 이 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소의 재원에 의해 설립된 신호정보 특화연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었음.

• First Author : DGIST Department of Information and Communication Engineering, ishdgist@dgist.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : DGIST Department of Information and Communication Engineering, jwchoi@dgist.ac.kr, 종신회원

* DGIST Department of Information and Communication Engineering, krcapt13@dgist.ac.kr, 학생회원

** DGIST Department of Information and Communication Engineering, jayslee@dgist.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2016-09-271, Received September 23, 2016; Revised October 10, 2016; Accepted October 10, 2016

안테나를 이용한 빔형성 기법을 항재밍에 활용하는 연구도 활발히 이루어지고 있다^{3,4,5}. 수신단에서 빔형성을 통해 재밍신호를 상쇄하고 정보신호를 보강하여 항재밍 성능을 올릴 수 있다. 하지만 채널환경의 변화에 따라 부엽이 커질 수 있고 주엽의 선택도가 저하되어 수신되는 재밍전력이 커질 수 있다. 게다가 최근 하드웨어 기술의 발달로 재머의 처리능력 및 가용전력이 급격히 증가하였으며, 심지어 도감청 후 획득한 정보를 활용하여 좀 더 효율적인 공격을 감행하기도 한다. 최근에 이러한 상황을 극복하기 위해 유도신호를 사용하여 재머를 스푸핑(Spoofing)함으로써 재밍전력을 낮추는 기법이 소개되었다²¹. 즉, 정보신호와 다른 주파수 대역을 사용하는 유도신호를 재머로 송신 빔형성을 하게 되면 재머는 수신된 정보신호와 유도신호 중 어떤 신호를 공격해야 하는지 알 수 없기 때문에, 재밍 전력을 분배할 수 밖에 없다. 사실, 이러한 기법을 사용하기 위해서는 송신단에서 피드백 정보가 필요하지만 재밍공격이 이루어지고 있는 상황에서 수신단으로부터의 이러한 피드백 정보를 수신하는 것은 어렵다. 따라서 본 논문에서는 송신단에서 제한된 피드백 정보로 송신 빔형성을 할 수 있는 기법을 제안하고자 한다. 시뮬레이션을 통해 피드백 정보가 있는 최적 빔형성에 비해 성능열화가 미미함을 확인할 수 있다.

II. 본 론

2.1 시스템 모델

그림 1에서 표현되었듯이 N_J 개의 안테나를 가진 하나의 재머가 존재하는 상황에서 N_T 개의 안테나를 가진 송신기와 N_R 개의 안테나를 가진 수신기가 통신

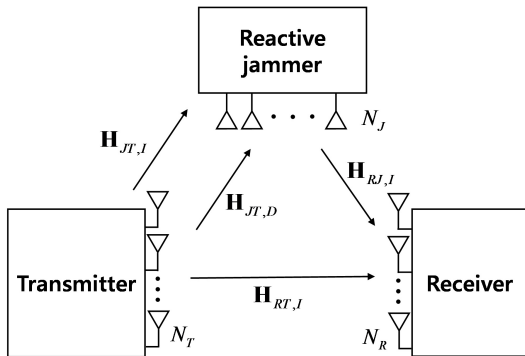


그림 1. 한 쌍의 송수신단 및 재머 사이의 채널
Fig. 1. Channel between each node such as transmitter, receiver, and jammer.

을 하는 상황을 가정한다. 모든 채널정보는 채널의 호해성을 통해 획득 가능하며, 재머는 감지되는 주파수 대역의 신호들에 대해 water-filling 기반의 최적의 전력분배를 실시한다고 가정한다. 이러한 환경에서 송수신 빔형성 벡터를 도출하기 위한 최적화 목적함수 SJNR은 아래와 같다.

$$SJNR_p = \frac{E \left\{ \left\| \sqrt{P_S} \gamma \mathbf{g}^H \mathbf{H}_{RT,I} \mathbf{w}_I s_I \right\|^2 \right\}}{E \left\{ \left\| \mathbf{g}^H \mathbf{H}_{RJ,I} \sqrt{P_{J,eff}} \mathbf{z} + \mathbf{g}^H \mathbf{n}_I \right\|^2 \right\}} \quad (1)$$

이 식에서 P_S 는 송신전력, $P_{J,eff}$ 는 유도신호에 의해 감소된 유효 재밍전력, γ 는 총 송신전력에 대한 정보신호의 전력 비, \mathbf{g} 는 $N_R \times 1$ 수신 빔형성 벡터, \mathbf{w}_I 는 정보신호에 대한 $N_T \times 1$ 송신 빔형성 벡터, s_I 는 정보신호, \mathbf{z} 는 $N_J \times 1$ 재밍신호, \mathbf{n}_I 는 정보신호에 대한 $N_R \times 1$ 잡음 벡터, $\mathbf{H}_{RT,I}$ 는 송신기와 수신기 사이의 정보신호에 대한 $N_R \times N_T$ 채널, $\mathbf{H}_{RJ,I}$ 는 재머와 수신기 사이의 $N_R \times N_J$ 재밍채널을 나타낸다.

2.2 송수신 빔형성 벡터

우선 식 (1)을 최대화 하는 최적 수신 빔형성 벡터는 다음과 같다.

$$\mathbf{g}^* = c \left(\frac{P_{J,eff}}{N_J} \mathbf{H}_{RJ,I} \mathbf{H}_{RJ,I}^H + \sigma_{n_I}^2 \mathbf{I}_{N_R} \right)^{-1} \mathbf{H}_{RT,I} \mathbf{w}_I \quad (2)$$

여기서 c 는 수신 빔형성 정규화를 위한 상수, N_J 는 재머의 안테나 개수, $\sigma_{n_I}^2$ 는 정보신호에 대한 잡음 전력을 나타낸다. 식 (2)를 (1)에 대입한 후 이를 최대화 하는 정보신호를 위한 최적 송신 빔형성 벡터는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\mathbf{w}_I^* = U_{max} \left\{ \begin{aligned} & \left(\gamma \mathbf{I}_{N_T} + \left\| \mathbf{H}_{JT,D} \mathbf{w}_D \right\|^2 (1-\gamma) (\mathbf{H}_{JT,I}^H \mathbf{H}_{JT,I})^{-1} \right) \\ & \times \mathbf{H}_{RT,I}^H (\mathbf{H}_{RJ,I} \mathbf{H}_{RJ,I}^H)^{-1} \mathbf{H}_{RT,I} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

여기서 $U_{max}(\cdot)$ 는 최대 고유값에 해당하는 고유벡터, \mathbf{w}_D 는 유도신호에 대한 $N_T \times 1$ 송신 빔형성

벡터, $\mathbf{H}_{JT,D}$ 는 송신기와 재머 사이의 유도신호에 대한 $N_J \times N_T$ 채널, $\mathbf{H}_{JT,I}$ 는 송신기와 재머 사이의 정보신호에 대한 $N_J \times N_T$ 채널을 나타낸다.

송신단에서 항재밍 빔형성을 위해서는 $\mathbf{H}_{RT,I}$ 와 $\mathbf{H}_{RJ,I}$ 관련 채널정보를 수신단으로부터 피드백 받아야 한다. 하지만 우리는 송신단에서 $\mathbf{H}_{RJ,I}$ 관련 채널 정보 없이 근최적 빔형성이 가능한 기법을 제안한다. 피드백이 제한된 상황에서 근최적의 송수신 빔형성 벡터를 도출하기 위한 목적함수 SLR은 아래와 같다.

$$SLR = \frac{E \left\{ \left\| \sqrt{P_S} \gamma \mathbf{H}_{RT,I} \mathbf{w}_I s_I \right\|^2 \right\}}{E \left\{ \left\| \sqrt{P_S} \gamma \mathbf{H}_{JT,I} \mathbf{w}_I s_I \right\|^2 \right\}} \quad (4)$$

정보신호를 위한 근최적 송신 빔형성 벡터는 (4)를 최대화 함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{w}_I^* = \mathbf{U}_{max} \left\{ \left(\mathbf{H}_{JT,I}^H \mathbf{H}_{JT,I} \right)^{-1} \mathbf{H}_{RT,I}^H \mathbf{H}_{RT,I} \right\} \quad (5)$$

유도신호에 대한 최적 송신 빔형성 벡터는 송신기에서 재머로 가는 유도신호의 전력을 최대화 함으로써 아래와 같이 도출 가능하다.

$$\mathbf{w}_D^* = \mathbf{U}_{max} \left(\mathbf{H}_{JT,D}^H \mathbf{H}_{JT,D} \right) \quad (6)$$

실제로는 γ 에 대한 최적화도 필요하지만, 본 논문에서는 γ 가 최적으로 설정된 상황을 가정하여 식 (2), (5), (6)를 적용한 통신의 신뢰도 성능을 측정하였고, (5)를 대신하여 (3)을 적용했을 때와 비교한다.

III. 모의실험

유도신호를 활용한 항재밍 빔형성 기술의 통신 신뢰도 및 전송률을 모의실험을 통해 평가한다. 유도신호를 사용한 경우를 “Proposed”, 사용하지 않은 경우를 “Conventional”로 정의한다. 유도신호는 정보신호와 동일한 대역을 가지므로 총 대역폭에 대한 정보신호 대역의 비율을 나타내는 β 는 1/2로 가정한다.

그림 2는 signal-to-noise power ratio (SNR) 및 jamming-to-signal power ratio (JSR)에 따른 평균 SJNR 성능을 최적의 빔형성 기술을 적용하였을 때와

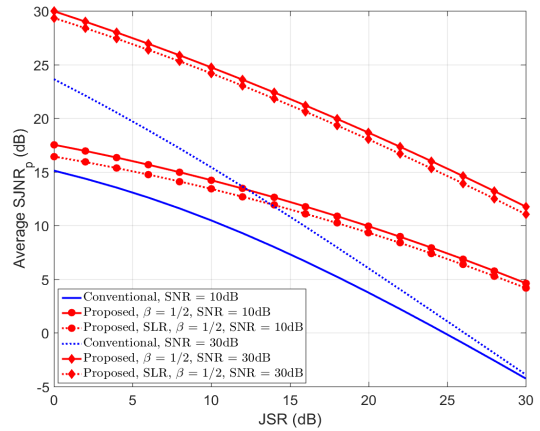


그림 2. 재밍전력에 따른 통신 안정도 비교
Fig. 2. Comparison of communication reliability according to JSR

비교한다. 그림 2에서 보여지듯이 JSR이 높을수록 혹은 SNR이 높을수록 “Proposed” 및 “Proposed, SLR”의 성능이 “Conventional”보다 점점 향상됨을 알 수 있다. “Proposed”의 경우는 유도신호로의 송신 파워 분배로 인해 실제 정보신호에 할당된 유효 전력은 “Conventional”보다 작다. 하지만 “Proposed”는 유도신호를 통해 더 큰 재밍 전력을 유도하여 정보 신호로 향하는 재밍 전력을 대폭 감소시키는 역할을 한다. 이러한 유도신호의 항재밍 효과는 재밍 전력이 높을수록 혹은 잡음 전력이 낮을수록 점점 향상됨을 확인할 수 있다. 여기서 주목할 부분은 피드백이 불완전한 상황을 나타내는 “Proposed, SLR”의 경우 SLR을 최대화 하는 빔형성 기법을 적용하더라도 최적 성능에 거의 근접하는 성능을 얻을 수 있다는 점이다. 이는 유도신호의 항재밍 효과가 부족한 피드백을 대부분 보상할 수 있음을 의미한다.

그림 3은 SNR 및 JSR에 따른 평균 채널 용량을 비교한다. 그림 2와 달리 채널용량은 높은 JSR 환경에서 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 2에서 보여지듯이 낮은 JSR에서는 “Proposed”이 “Conventional”에 비해 얻는 SJNR 이득이 작고, 더욱이 높은 JSR인 경우에 비해 채널용량은 대역폭 손실에 민감하다. 하지만 JSR이 커짐에 따라 SJNR 이득이 커지고, 채널용량은 대역폭 손실보다 SJNR 이득에 더 민감하게 되므로 특정 JSR 지점에서 성능역전 현상이 발생한다. 그림 2와 마찬가지로 그림 3에서의 평균 채널용량 또한 피드백이 불완전한 상황에서의 제안기법은 최적의 성능에 근접한다.

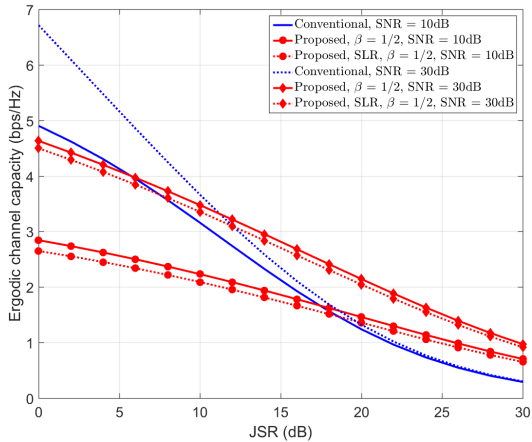


그림 3. 재밍전력에 따른 통신 전송률 비교
 Fig. 3. Comparison of communication throughput according to JSR

IV. 결 론

본 논문은 피드백이 제한된 상황에서 유도신호를 활용한 항재밍 빔형성 기술의 성능을 측정하였고, 완전한 피드백이 가능한 경우에 거의 근접하는 성능을 보여준다. 이는 유도신호로 인해 줄어든 유효한 재밍 전력이 불완전한 피드백으로 인한 성능열화를 충분히 보상할 수 있음을 의미한다. 재밍 채널 정보가 불완전한 경우에 대해서는 추가적인 성능 분석이 필요하다.

References

- [1] Y. Kim, "Channel-hopping scheme for enhancing fairness performance under smart jammer attacks in tactical WLANs," *J. KICS*, vol. 40, no. 11, pp. 2188-2195, Nov. 2015.
- [2] C. Park, S. Han, S.-H. Lim, and J.-W. Choi, "Strategic beamforming scheme using decoy signal for anti-jamming," in *Proc. KICS ICC 2016*, pp. 161-162, Jeongseon, Korea, Jan. 2016.
- [3] Z. Shengjun, H. Kaizhi, and L. Xiangyu, "Adaptive transmit and receive beamforming based on subspace projection for anti-jamming," in *Proc. IEEE MILCOM'14*, pp. 388-393, Baltimore, MD, USA, Oct. 2014.
- [4] Q. Liu, M. Li, X. Kong, and N. Zhao, "Disrupting MIMO communications with optimal jamming signal design," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 10, pp. 5313-5325, Oct. 2015.
- [5] J. Becker, "Dynamic beamforming optimization for anti-jamming and hardware fault recovery," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. and Comput. Eng., Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2014.