

지능반사표면 도움 주변후방산란통신 네트워크에서 다중태그 선택 기법

윤정우, 김준수, 김수민*
한국공학대학교

{yoon3932332, junsukim, *suminkim}@tukorea.ac.kr

A Multi-Tag Selection Scheme in IRS-Assisted AmBC Networks

Jeong Woo Yoon, Junsu Kim, and Su Min Kim*
Tech University of Korea (TU Korea)

요약

본 논문에서는 지능반사표면 (intelligent reflecting surface, IRS)의 도움을 받는 주변후방산란통신 (ambient backscatter communication, AmBC) 네트워크에서 다중태그 선택 기법을 제안한다. IRS가 존재하지 않는 시스템에서의 랜덤 태그선택 기법과 최대전력 태그선택 기법보다 IRS 도움 최대전력 태그선택 기법이 비트오류율 (bit error rate, BER)과 데이터 전송률 (achievable rate) 측면에서 성능이 더 뛰어나고, IRS의 반사 요소들의 값이 랜덤한 위상값을 가졌을 때보다 선택된 태그의 채널 크기를 향상시키도록 위상값을 조정했을 때 최대 성능을 얻을 수 있다.

I. 서론

IoT에 대한 관심이 높아지면서 대규모 IoT 네트워크에서 무선 통신을 위한 주파수 대역 확보 및 효율화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이를 해결하기 위한 유망한 기술로 주변후방산란통신 (AmBC) 방식이 제안되었다 [1]. 주변후방산란통신은 송신신호를 직접 생성하지 않고 주변에 존재하는 방사된 무선신호를 안테나의 임피던스 매칭으로 반사 또는 흡수를 조정하여 정보를 전달하는 초저전력 통신 기술이다. 최근, 다중태그 환경에서 최적태그 선택 전송기법들이 제안되었다 [2, 3].

한편, 지능반사표면 (IRS)은 무선전파 매체를 조정하여 신호품질을 높이는 차세대 통신기술로서 각 안테나 배열 요소는 들어오는 신호에 대해 위상변이를 독립적으로 부과하여 무선전파 환경을 재구성하여 무선 시스템의 스펙트럼 및 에너지 효율성을 향상시킬 수 있다 [4].

본 논문에서 다중태그 환경의 주변후방산란통신 네트워크에 IRS의 안테나 위상조정과 다중태그 선택 기법을 제안하여 비트오류율과 데이터 전송률 성능을 향상시키고자 한다.

II. 시스템 모델

그림 1은 IRS가 도입된 다수의 태그가 존재하는 주변후방산란통신 시스템 환경을 나타낸다. 1개의 RF source, 1개의 reader, K개의 태그가 존재하고 각각 단일 안테나를 사용한다. IRS는 [5]에서처럼 source와 태그 사이에 배치하고 N개의 안테나 반사 요소 (element)를 장착하고 있다. IRS는 각 요소가 위상을 적절히 조정하여 source로부터의 무선신호를 반사시켜 수신 신호 전력을 향상시킬 수 있도록 동작한다. 태그는 배터리 전원으로 동작한다고 가정하고, 안테나 임피던스 매칭/비매칭을 통해 흡수/반사를 조정하여 '0'/'1'의 비트 정보를 reader로 전송한다. 또한, reader는 모든 채널상태정보

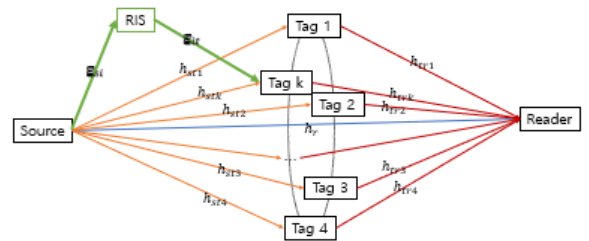


그림 1 시스템 모델

(channel status information, CSI)를 완벽하게 알고있다고 가정하고, 하나의 프레임에서 다수의 태그 중 하나만 선택되어 전송한다고 가정한다.

III. 제안 IRS 도움 AmBC 다중태그 선택 기법

본 장에서는 IRS 도움 AmBC 다중태그 선택 기법을 제안한다. 먼저, source와 reader, source와 k번째 태그, k번째 태그와 reader의 채널은 각각 h_{sr} , h_{stk} , h_{tkr} 로 나타내며, source와 IRS 사이의 채널과 IRS와 k번째 태그 사이의 채널은 $g_{si} \in \mathbb{C}^{1 \times m}$ 와 $g_{itk} \in \mathbb{C}^{m \times 1}$ 로 나타낸다. Source의 송신 신호는 $s(n) = \tilde{s}(n)e^{j2\pi f_s n}$ 이며 이때 f_s 는 RF source의 캐리어 주파수를 나타내고, $\tilde{s}(n)$ 은 복소 기저대역 신호 (complex baseband equivalent signal)를 나타낸다.

k번째 태그에서 수신된 신호는 source에서 k번째 태그로 전송된 신호와 source에서 IRS를 거쳐 k번째 태그에서 수신된 신호의 합인 $(g_{si}\theta_k g_{itk} + h_{stk})s(n)$ 로 나타낸다. 이때, k번째 태그를 위한 IRS 반사 요소들의 위상변이 벡터는 $\theta_k = [\theta_{k,1}, \dots, \theta_{k,N}]^T$, $\theta_m \in [0, 2\pi]$, $m = 1, \dots, N$ 로 나타내고, IRS 위상변이 매트릭스는 $\Theta_k = \text{diag}(e^{j\theta_{k,1}}, \dots, e^{j\theta_{k,N}})$ 로 표현한다. 태그는 자기 자신의 이진 신호 $B(n)$ 를 전송하기 위해 신호를

후방산란시키고, 안테나 효율인자를 η 로 나타내면 k 번째 태그에서 후방산란되는 신호는 $\eta(\mathbf{g}_{st}^H \mathbf{\theta}_k \mathbf{g}_{it_k} + h_{st_k})s(n)B(n)$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 k 번째 태그가 선택되었을 때, reader 에서 수신 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_k(n) &= h_{sr}s(n) + [\eta(\mathbf{g}_{st}^H \mathbf{\theta}_k \mathbf{g}_{it_k} + h_{st_k})s(n)]B(n) + w(n) \\ &= \begin{cases} h_{sr}s(n) + w(n), & \text{if } B(n) = 0, \\ h_{sr}s(n) + [\eta(\mathbf{g}_{st}^H \mathbf{\theta}_k \mathbf{g}_{it_k} + h_{st_k})s(n)] + w(n), & \text{if } B(n) = 1. \end{cases} \end{aligned}$$

여기에서 최적의 IRS 위상 변이를 구할 필요가 있다. 최적의 IRS 위상값($\mathbf{\theta}_k^*$)은 source 에서 IRS 를 거쳐 k 번째 태그에 이르는 링크의 채널 위상과 source 에서 k 번째 태그의 채널의 위상이 서로 동일하도록 하는 것이 채널의 크기를 최대화할 수 있고, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{\theta}_k^* = \angle h_{st_k} - (\angle \mathbf{g}_{st}^H + \angle \mathbf{g}_{it_k}) \quad (1)$$

(1)에서 구한 k 번째 태그를 위한 위상을 IRS 에 적용하고 난 후, 실험적인 평균 수신전력을 최대화하도록 아래와 같이 다중태그 선택 기법을 제안한다.

$$\hat{k} = \arg \max_{1 \leq k \leq K} \left| \frac{1}{N_0} \sum_{n=1}^{N_0} |y_k(n)|^2 - \xi_k \right| \quad (2)$$

여기서 ξ_k 는 프리앰블로 사전 측정된 디코딩 문턱값이다.

IV. 성능평가 결과

제한한 IRS 도움 다중태그 선택 기법의 성능을 평가하기 위해 평균 비트 오류율 (BER)과 평균 데이터 전송률 (achievable rate)을 성능척도로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 환경은 모든 링크에 대해 채널 이득은 i.i.d. 하다고 가정한다 (i.e., $\sigma_w^2 = \sigma_{h_{sr}}^2 = \sigma_{h_{tkr}}^2 = \sigma_{g_{st}}^2 = \sigma_{g_{it_k}}^2 = 1$). 모든 결과에 대해 총 태그 개수(K)는 5 개로 고정하였으며, 안테나 효율인자 (η)는 0.1 로, source 데이터 전송률은 1Mbps 로 설정하였다. 평균 BER 과 평균 데이터 전송률은 [2]에서와 같이 정의하였다.

그림 2 는 SNR ($\sigma_{h_{st_k}}^2 = 0:2:20[\text{dB}]$)에 따른 평균 BER 성능을 나타내고, 그림 3 은 SNR 에 따른 평균 데이터 전송률 성능을 나타낸다. 평균 BER 과 평균 데이터 전송률 측면에서 모두 IRS 가 지원하지 않는 기법보다 IRS 가 지원하는 환경에서의 다중태그 선택기법들이 훨씬 더 좋은 성능을 보인다. IRS 도움 다중태그 선택에 대해서는 랜덤 위상제어 대비 (1)에서 구한 최적 위상제어를 적용한 기법이 IRS 도움의 효과를 최대화 하여 항상 더 좋은 성능을 얻는다. 또한, IRS 의 개수를 늘렸을 때, 수신 전력 향상을 통해 평균 BER 과 평균 데이터 전송률을 더욱 향상시킬 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 IRS 가 지원되는 다중 태그가 존재하는 주변후방산란통신 (AmBC) 시스템의 평균 BER 과 평균 데이터 전송률을 향상시키는 IRS 위상제어 및 다중태그 선택 기법을 제안하였다. 성능평가 결과, IRS 가 존재하는 환경에서의 AmBC 시스템이 항상 좋은 성능을 얻었으며, IRS 가 존재하는 환경에서 동일한 최대전력 태그선택 기법을 적용하더라도 제안하는 최적 위상제어를 적용했을 때, IRS 도입으로 인한 채널이득의 크기가 반사 요소의 개수에 비례하여 더 커지면서 훨씬 더 향상된 성능을 보였다.

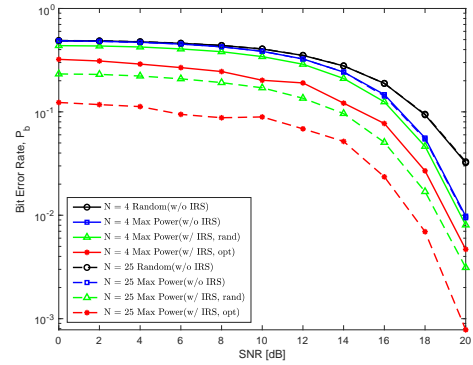


그림 2 SNR vs. 평균 BER

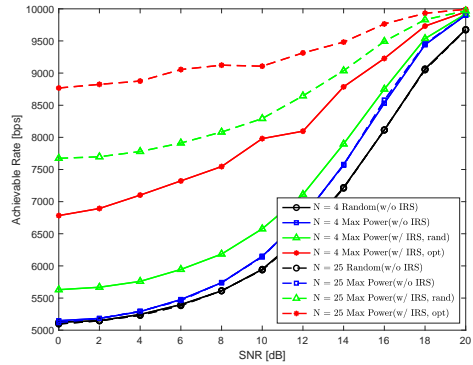


그림 3 SNR vs. 평균 데이터 전송률

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 ICT 혁신인재 4.0 사업 (IITP-2023-RS-2022-00156326)과, 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음 (No. 2022R1F1A1074556).

참고 문헌

- [1] V. Liu, A. Pakr, V. tall, S. Gollakota, D. Wetherall, and J. R. Smith, "Ambient Backscatter: Wireless Communication Out of Thin Air," in *Proc. ACM SIGCOMM*, Aug. 2013.
- [2] J. Y. Han, M. J. Kim, J. Kim, and S. M. Kim, "Physical Layer Security in Multi-Tag Ambient Backscatter Communications - Jamming vs. Cooperation," in *Proc. International Wireless Communications and Networking Conference*, May 2020.
- [3] M. J. Kim, J. Kim, and S. M. Kim, "Multi-Tag Selection in Cognitive Ambient Backscatter Communications for Next-Generation IoT Networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, pp. 1-12, Jan. 2022.
- [4] Chunhua Pan et al., "Reconfigurable Intelligent surfaces for 6G systems: Principles, Applications, and Research Directions," *IEEE Commun. Mag.*, pp.14-20, June 2021.
- [5] Y.Chen, "Performance of Ambient Backscatter Systems Using Reconfigurable Intelligent Surface," *IEEE Commun. Letters*, vol. 25, no. 8, Aug. 2021.