

저궤도 위성 통신에 적용 가능한 페러데이 회전각 정밀 계산 기법

이도현, 양준모, 박용배*

아주대학교 AI 융합네트워크학과, 아주대학교 전자공학과*

yong@ajou.ac.kr

A Precise Calculation Method of Faraday Rotation Angle Applicable to Low Earth Orbit Satellite Communications

Do Hyeon Lee, Junmo Yang, Yong Bae Park

Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou University

Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University

요 약

저궤도 위성(LEO) 통신에서 전리층을 통과하는 전자파의 페러데이 회전(FR)은 편파 불일치를 유발하여 수신 신호의 품질을 저하시킨다. 본 연구는 IRI-2016 전자밀도 및 IGRF-13 지자기장 모델과 Appleton - Hartree 방정식을 활용해 정상파와 비정상파 굴절률 차이를 적분하여 페러데이 회전각(FRA)을 계산하는 방법을 제안한다. 제안 기법은 기존 방법 대비 계산 정확도를 높여 다양한 주파수 및 안테나 지향 조건에서도 편파 손실을 최소화하고, LEO 통신 시스템의 수신 성능을 향상시킬 수 있다.

I. 서 론

전리층을 통과하는 전자파는 굴절, 감쇠, 시간 지연, 페러데이 회전(Faraday rotation, FR) 등 다양한 현상을 겪는다 [1]. 이 중 FR은 송·수신 안테나 간 편파 불일치를 유발하여 통신 링크의 성능을 저하시킬 수 있으며, 위성 통신에서는 이러한 신호 손실을 방지하기 위해 FR의 정밀 계산이 필수적이다. 전리층은 태양 활동, 지자기 폭풍, 주·야간 변화 등 여러 요인에 따라 변화하며, 이러한 동적 특성은 FR 계산의 정확도에 영향을 미친다. 특히 저궤도 위성(LEO) 통신에서는 위성의 고속 이동으로 전파 경로가 급격히 변화하므로, 오차 없는 FR 산출 기법이 요구된다. 기존의 FR 계산법은 평균 지자기장 값 혹은 준-종단 방향(quasi-longitudinal) 전파 가정을 기반으로 계산한다. [2],[3], 하지만 기존의 방법은 방위각 및 고도각 변화에 따른 페러데이 회전 각도(FRA)를 정확하게 계산하지 못하는 한계가 있다 [4]. 따라서 본 연구에서는 3차원 전자밀도 및 지자기장 분포를 따라 실제 전파 경로를 계산한 후, 수신 지점에서의 정확한 FRA를 계산하는 기법을 제안한다.

II. 본론

본 연구는 Appleton - Hartree 방정식을 기반으로 전리층 내 전파 경로를 결정하고, 이를 통해 FRA를 정밀하게 계산하는 방법을 제안한다. Appleton - Hartree 방정식은 굴절률을 전자 밀도와 주파수의 함수로 표현하며, 특히 UHF 이상 고주파 대역에서는 지자기장과 전자 충돌의 영향을 무시한 단순화된 형태로 적용 가능하다. 전자 밀도는 IRI-2016 모델을 통해 획득하며, 각 지점의 굴절률 계산에 활용된다. 전파 경로는 송신 지점의 초기 위치(위도, 경도)와 지향 방향(방위각, 고각), 운용 주파수에 따라 정해진다. 전파 경로가 결정된 이후, IGRF-13 모델을 통해 해당 경로상의 각 지점에서 지자기장 정보를 추출한다. 이러한 전자 밀도 및 지자기장 데이터를 바탕으로 Appleton - Hartree 방정식을 적용하여 정상파와 비정상파의 굴절률을 각각 계산한다. 이후 두 파의 굴절률 차이를 이용해 페러데이 회전 각도를 적분하여 도출함으로써, 전체 경로에 따른 누적 FRA를 산출한다.

III. 결론

본 연구는 3차원 전자 밀도와 지자기장 데이터를 기반으로 전리층을 통과하는 전자파의 페러데이 회전 각도(FR)를 정밀하게 계산하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 기존의 준-종단 가정법 및 ITU-R 권고 방식에 비해 높은 정확도를 제공하며, 전리층 전역(90~1000 km)에 걸쳐 다양한 주파수 대역을 고려할 수 있다. 특히, 안테나의 고도각 및 방위각 변화에 따른 FR의 동적 분석이 가능하며, 시간 및 공간적으로 변화하는 전리층 환경에서도 정밀한 FR 계산을 수행할 수 있다. 본 연구 결과는 편파 손실을 최소화함으로써 저궤도 위성 통신에서 수신 신호 품질 향상에 기여할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

The Institute of Information and Communications Technology Planning and Evaluation (IITP) Grant funded by the Korea Government (MSIT), Development of 3D-NET Core Technology for High-Mobility Vehicular Service, under Grant 2022-0-00704-001

참 고 문 헌

- [1] K. G. Budden, Radio waves in the ionosphere: The mathematical theory of the reflection of radio waves from stratified ionised layers. London, UK: Cambridge University Press, 1961.
- [2] A. C. Cushley, K. Kabin, and J.-M. Noel, "Faraday rotation of automatic dependent surveillance-broadcast (ads-b) signals as a method of ionospheric characterization," Radio Science, vol. 52, no. 10, pp. 1293 - 1300, 2017.
- [3] ITU-R, "Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite networks and systems," ITU-R P.531-14, August 2019.
- [4] Singh, M. & Bettenhausen, M. H. An accurate and efficient algorithm for faraday rotation corrections for spaceborne microwave radiometers. Radio Sci. 46, 1 - 16 (2011).