다중 게이트웨이 기반 군집 저궤도 위성 통신시스템을 위한 간섭 상쇄 기술

성재협, 신원재

고려대학교 전기전자공학부

jaehyup@korea.ac.kr, wjshin@korea.ac.kr

Interference Neutralization for Multi-Gateway LEO Satellite Constellation Networks

Jaehyup Seong and Wonjae Shin

School of Electrical Engineering, Korea University.

요 약

다중 게이트웨이를 활용한 군집 저궤도 위성 통신시스템은 게이트웨이 간 자원을 공유하여 사용함으로써 피더링크를 통해 전송할 수 있는 데이터양을 대폭 향상 시킬 수 있어, 차세대 이동통신시스템에서 요구되는 높은 데이터 처리량을 충족시킬 수 있는 유망한 기술로 주목받고 있다. 하지만, 다중 게이트웨이 간 자원을 재사용하게 되면 피더링크에서의 신호 간섭이 발생하게 되고, 이는 사용자 링크에서 위성 커버리지 간 추가적인 신호 간섭을 일으킨다. 본 논문에서는 다중 게이트웨이 기반 군집 저궤도 위성 통신 시스템에서 위성 커버리지 간 간섭을 상쇄시킬 수 있는 군집 저궤도 위성들의 협력적 빔포밍 설계를 통한 간섭 상쇄 기술을 소개한다.

Ⅰ. 연구배경 및 목적

다중 게이트웨이 기반의 군집 저궤도 위성통신시스템은 게이트웨이 간 자원을 공유함으로써 광범위한 지역에 낮은 지연시간으로 높은 데이터양을 제공할 수 있어, 차세대 이동통신시스템을 위한 유망한 핵심 기술 중 하나로 각광 받고 있다. 하지만, 게이트웨이 간 자원을 재사용 하게 되면 피더링크에서의 추가적인 간섭이 발생하게 되고 이는 사용자 링크에서의 성능을 감쇠시킨다 [1]. 본 논문에서는 이를 극복하기 위해 군집 저궤도 위성들의 협력적 빔포밍 설계를 통한 간섭 상쇄기술을 소개하고, 기술구현을 위해 필요한 저궤도 위성의 개수 및 저궤도 위성의 안테나 개수를 구한다.

Ⅱ. 시스템 모델 및 제안하는 간섭 상쇄 기법

본 논문에서는 N_{G}개의 안테나가 장착된 K개의 게이트웨이가 동일한 자원을 사용하여 N_{S}개의 안테나가 장착된 L개의 저궤도 위성을 통해 N_{R}명의 단일 안테나 사용자가 있는 커버리지를 각각 서비스하는 상황을 고려하였다. 이때, l번째 위성이 K개의 게이트웨이로부터 수신 받는 신호는

$$\mathbf{y}_l^{\mathrm{S}} = \sum_{j=1}^{K} \mathbf{G}_{l,j}\mathbf{P}_j\mathbf{s}_j + \mathbf{n}_l^{\mathrm{S}} \in C^{N_{\mathrm{S}}\times 1} \tag{1}$$

와 같이 표현된다. $\mathbf{G}_{l,j}$, $\mathbf{P}_j$, $\mathbf{s}_j=[s_{j,1},\cdots,s_{j,N_{\mathrm{R}}}]^{\mathrm{T}}$ 는 각각 j번째 게이트웨이와 l번째 위성간의 채널, j번째 게이트웨이의 프리코더와 스트림 벡터이고, $\mathbf{n}_l^{\mathrm{S}}$는 l번째 위성에서의 잡음 성분이다. 이후 l번째 위성은 수신신호 $\mathbf{y}_l^{\mathrm{S}}$에 프리코더 $\mathbf{V}_l$를 곱하여 채널 $\mathbf{H}_{k,l}$를 통해 k번째 게이트웨이의 커버리지 내 사용자들에게 신호를 전송한다. 일련의 과정에서 사용자들의 수신신호는 하기와 같이 벡터 형태로 표현될 수 있으며 $\mathbf{n}_k$는 사용자 잡음 성분이다.

$$\begin{aligned}\mathbf{y}_k &= \sum_{l=1}^{L}\mathbf{H}_{k,l}\mathbf{V}_l\Big(\sum_{j=1}^{K}\mathbf{G}_{l,j}\mathbf{P}_j\mathbf{s}_j + \mathbf{n}_l^{\mathrm{S}}\Big) + \mathbf{n}_k \\ &= \sum_{l=1}^{L}\mathbf{H}_{k,l}\mathbf{V}_l\mathbf{G}_{l,k}\mathbf{P}_k\mathbf{s}_k + \sum_{l=1}^{L}\mathbf{H}_{k,l}\mathbf{V}_l\sum_{\substack{j=1,\\ j\neq k}}^{K}\mathbf{G}_{l,j}\mathbf{P}_j\mathbf{s}_j + \sum_{l=1}^{L}\mathbf{H}_{k,l}\mathbf{V}_l\mathbf{n}_l^{\mathrm{S}} + \mathbf{n}_k.\end{aligned} \tag{2}$$

상기 수식으로부터 k번째 게이트웨이의 커버리지 내 사용자들에 대해 다른 게이트웨이들로부터 발생하는 간섭을 상쇄하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\sum_{l=1}^{L}\mathbf{H}_{k,l}\mathbf{V}_l\mathbf{G}_{l,j} = \mathbf{0}_{N_{\mathrm{G}}\times N_{\mathrm{R}}},\ \forall j\neq k. \tag{3}$$

이를 Kronecker product의 성질인 $\overrightarrow{\mathbf{ACB}} = (\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\otimes\mathbf{A})\vec{\mathbf{C}}$을 활용하면

$$\sum_{l=1}^{L}(\mathbf{G}_{l,j}^{\mathrm{T}}\otimes\mathbf{H}_{k,l})\vec{\mathbf{V}}_l = \mathbf{0}_{N_{\mathrm{G}}N_{\mathrm{R}}\times 1},\ \forall j\neq k \tag{4}$$

와 같이 변형할 수 있다. 여기서 $\mathbf{G}_{l,j}^{\mathrm{T}}\otimes\mathbf{H}_{k,l}$ 는 $N_{\mathrm{G}}N_{\mathrm{R}}\times N_{\mathrm{S}}^2$ 크기의 행렬이고 $\vec{\mathbf{V}}_l$는 $N_{\mathrm{S}}^2\times 1$ 크기의 벡터이며, 행렬식 (4)가 만족하기 위해서는 행렬식

$$[\mathbf{G}_{1,j}^{\mathrm{T}}\otimes\mathbf{H}_{k,1},\cdots,\mathbf{G}_{L,j}^{\mathrm{T}}\otimes\mathbf{H}_{k,L}][\vec{\mathbf{V}}_1^{\mathrm{T}},\cdots,\vec{\mathbf{V}}_L^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} = \mathbf{0}_{N_{\mathrm{R}}N_{\mathrm{G}}\times 1},\ \forall j\neq k \tag{5}$$

이 성립하여야 한다. 또한, 이러한 조건이 $\forall j\neq k$에 대해 만족하려면 행렬식

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{1,1}^{\mathrm{T}}\otimes\mathbf{H}_{k,1},\cdots,\mathbf{G}_{L,1}^{\mathrm{T}}\otimes\mathbf{H}_{k,L} \\ \vdots \\ \mathbf{G}_{1,k-1}^{\mathrm{T}}\otimes\mathbf{H}_{k,1},\cdots,\mathbf{G}_{L,k-1}^{\mathrm{T}}\otimes\mathbf{H}_{k,L} \\ \mathbf{G}_{1,k+1}^{\mathrm{T}}\otimes\mathbf{H}_{k,1},\cdots,\mathbf{G}_{L,k+1}^{\mathrm{T}}\otimes\mathbf{H}_{k,L} \\ \vdots \\ \mathbf{G}_{1,K}^{\mathrm{T}}\otimes\mathbf{H}_{k,1},\cdots,\mathbf{G}_{L,K}^{\mathrm{T}}\otimes\mathbf{H}_{k,L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\mathbf{V}}_1 \\ \vdots \\ \vec{\mathbf{V}}_L \end{bmatrix} = \mathbf{A}_k\vec{\mathbf{V}} = \mathbf{0}_{(K-1)N_{\mathrm{R}}N_{\mathrm{G}}\times 1} \tag{6}$$

이 성립하여야 한다. 상기 수식 (6)에서 $\mathbf{A}_k$는 $(K-1)N_{\mathrm{G}}N_{\mathrm{R}}\times LN_{\mathrm{S}}^2$ 크기의 행렬이며 $\vec{\mathbf{V}}$는 $LN_{\mathrm{S}}^2\times 1$ 크기의 벡터이다. 이는 k번째 게이트웨이의 커버리지 내 사용자들에 대한 간섭 상쇄 조건이다. 이러한 조건이 K개의 모든 게이트웨이에 대한 커버리지 내 사용자들에게 성립하기 위한 조건식은

$$[\mathbf{A}_1^{\mathrm{T}},\cdots,\mathbf{A}_K^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}\vec{\mathbf{V}} = \mathbf{A}\vec{\mathbf{V}} = \mathbf{0}_{K(K-1)N_{\mathrm{R}}N_{\mathrm{G}}\times 1} \tag{7}$$

와 같으며, $\mathbf{A}$는 $K(K-1)N_{\mathrm{G}}N_{\mathrm{R}}\times LN_{\mathrm{S}}^2$ 크기의 행렬이다. 여기서 행렬 $\mathbf{A}$의 원소들이 독립적으로 생성됨에 따라, 행렬 $\mathbf{A}$는 $LN_{\mathrm{S}}^2 > K(K-1)N_{\mathrm{G}}N_{\mathrm{R}}$ 일 경우 (7)을 만족하는 영 벡터가 아닌 해가 항상 존재한다. 즉, 해당 조건이 만족할 시 행렬 $\mathbf{A}$의 영공간(null space)의 기저(basis)를 선형적으로 조합함으로써 모든 커버리지 간 간섭을 상쇄할 수 있다. 이후 각 게이트웨이에서는 각 커버리지의 다양한 목적함수(합-전송률 최대화, 최소-전송률 최대화, 전송률 매칭 등)에 따라 독립적으로 프리코더($\mathbf{P}_k, \forall k$)를 설계할 수 있다.

Ⅲ. 결론

본 논문에서는 다중 게이트웨이 기반 군집 저궤도 위성 통신시스템에서 위성 커버리지 간 간섭을 상쇄시키기 위한 기술 및 그 구현을 위한 조건을 소개하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No. 2022R1A2C4002065)과 정보통신기획평가원(No. 2024-00359235, No. 2022-0-00704, No. 2021-0-00260)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

[1] V. Joroughi *et al.*, “Precoding in multigateway multibeam satellite systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 7, pp. 4944-4956, Jul. 2016.