

차량 간 통신 환경을 위한 도로변 산란자 채널 모델의 도플러 스펙트럼 분석: 고속도로 환경에서 상호 접근 주행하는 경우의 사례 연구

유상조, González G. David, Hämäläinen Jyri, 김성규, 김기선

광주과학기술원, 알토대학교

{asapyoo, seongkyu, kskim}@gist.ac.kr {david.gonzalezgonzalez, jyri.hamalainen}@aalto.fi

Doppler Spectrum Analysis of a Roadside Scattering Model for Vehicular-to-Vehicular Channels: A Case Study of Expressway Oncoming Environments

Sangjo Yoo, David G. González, Jyri Hämäläinen, Seongkyu Kim, Kiseon Kim

Gwangju Institute of Science and Technology, Aalto University

요약

차량 간 통신 환경에서, 전송된 신호는 도로 위에서 움직이는 주변 차량보다는 정적인 도로변 산란자 (roadside scatterers, RSS)에 의해 최대 도플러 천이 특성을 갖는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 이러한 RSS가 차량 간 통신의 시변 채널특성에 끼치는 영향을 이론적으로 분석하기 위해, 이차원 RSS 모델을 기반으로 두 차량이 상호 접근 주행하는 경우 채널의 도플러 전력 스펙트럼 밀도 (power spectral density, PSD)를 분석하였다. 이론적인 분석 결과의 검증을 위해, 시뮬레이션 결과 및 IEEE 802.11p 표준 측정 데이터와 비교하였다. 비교 결과, 분석된 도플러 PSD가 이론적으로 정확할 뿐만 아니라, 측정 데이터와도 유사함을 보였다. 본 연구 결과는 다양한 차량 간 통신 채널의 시변 특성 분석 및 시뮬레이터 제작에 활용될 수 있다.

I. 서론

차량 간 (vehicle-to-vehicle, V2V) 통신은 최근 주목받고 있는 지능형 교통정보시스템, 커넥티드카 및 자율주행차량 시스템의 핵심기술이다 [1]. 상기 기술들의 주요 디자인 목표들 중의 하나는 근접 주행 차량 간 교통상황의 실시간 전파와 공유를 통해 교통사고 발생 확률을 낮춤으로써 개인/사회적 비용을 저감시키는데 있다. 이러한 특성으로 인해, V2V 통신은 매우 높은 수준의 신뢰성뿐만 아니라 낮은 지연 특성을 디자인 목표로 하고 있다. 그러나 V2V 통신 환경에서는 송수신 차량 간의 매우 높은 상대 속도로 인해 전송 신호는 도플러 확산에 의한 급격한 신호 감쇄를 겪고, 이는 결과적으로 통신 시스템의 신뢰성을 저하시킨다. 이러한 V2V 환경에서 신뢰성 있는 통신 시스템의 디자인, 최적화 및 테스트를 위해서는 현실적인 채널 모델링 및 시뮬레이터 디자인 기술, 그리고 도플러 전력스펙트럼밀도 (power spectral density, PSD) 모델링 및 분석기술이 필수적이다.

최근 V2V 통신 채널의 측정 연구결과들에 의하면, 송신 신호는 도로 위의 움직이는 차량보다는 주로 도로변의 나무, 표지판, 혹은 빌딩 등과 같은 정적인 도로변 산란자 (roadside scatterers, RSS)에 의해 더 큰 도플러 확산을 겪으며, 두 송수신 차량이 같은 방향으로 이동하는 경우 (same direction, SD) RSS는 독특한 W모양의 도플러 스펙트럼을 발생시키는 것으로 밝혀졌다 [2]. 이러한 RSS 성분이 V2V 채널의 도플러 PSD 특성에 미치는 영향을 이론적으로 분석하기 위해, [2]에서는 도로변 산란자들이 도로 양측 두 직선 위에 균등 분포함을 가정하는 일차원 (1D) RSS 모델을 제안하였고, SD 환경에서 도플러 PSD를 이론적으로 분석하였다. [3]에서는 1D RSS 모델보다 현실적인 이차원 (2D) RSS 모델을 제안하고, 해당 모델의 도플러 PSD에 대한 이론적인 해를 3중적분 형태로 유도 하였으나, 이는 일반적인 numerical solver로는 정확한 해석이 불가능하다.

위의 단점을 해결하기 위해, 최근 [4]에서는 확장된 2D RSS 모델을 제

안하고, 제안된 모델의 도플러 PSD와 도플러 주파수 확률밀도함수 (PDF)의 증가성을 이용하여 해석 가능한 단일 적분형태의 해를 유도하였으며, SD 시나리오에서의 채널 도플러 PSD를 분석하였다. 본 논문에서는 [4]의 결과를 기반으로, 고속도로에서 두 차량이 상호 접근 주행하는 경우 (Oncoming)의 채널 도플러 PSD를 분석한다. Oncoming 주행 환경은 V2V 채널 측정 연구에서 중요한 시나리오로 고려되어 왔으나 [5], 해당 채널 환경에서 RSS에 의한 도플러 PSD를 이론적으로 분석한 연구는 현재까지 존재하지 않는다. 본 논문에서 분석된 도플러 PSD는 IEEE 802.11p 표준 채널의 측정 데이터 [5]와 비교하여 그 유효성을 입증한다.

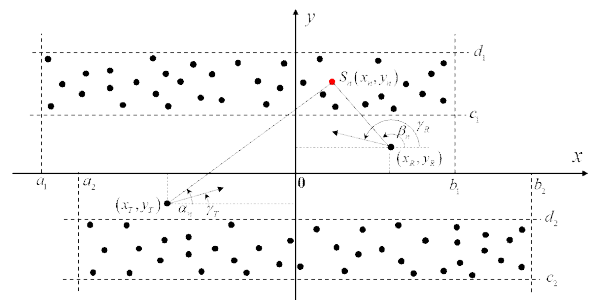


그림 1. 기하학적 도로변 산란자 모델

II. 기하학적 이차원 도로변 산란자 채널 모델

본 논문에서 고려하는 기하학적 2D RSS 모델은 그림 1과 같으며, 모델의 정의는 [4]와 같다. 그림 1에서, 송신기 (Tx)와 수신기 (Rx)는 (x_T, y_T) 및 (x_R, y_R) 에 위치하며, x 축을 기준으로 각각 $\gamma_T = 0$, $\gamma_R = \pi$ 의 방향과 v_T 및 v_R 의 속도로 이동한다 (Oncoming 환경). x 축은 도로의 중앙선을 나타내며, 도로의 양측 비대칭 사각형 영역에 N 개의 RSS들이 균등 분포하고 있음을 가정한다. n 번째 RSS는 S_n 로 표현되며,

그 위치는 (X_n, Y_n) ($n=1,2,\dots,N$)으로 정의된다. 여기서, (X_n, Y_n) 은 한쌍의 랜덤 변수이며, 이들의 joint PDF는 다음과 같이 정의 된다:

$$f_{X_n, Y_n}(x, y) = A^{-1} \quad (1)$$

이때, $A = A_1 + A_2$ 이며, 두 사각형 영역의 넓이의 합과 같다. 한편, S_n 에 의한 신호의 발산각 (angle-of-departure, AoD) 와 도래각 (angle-of-arrival, AoA) 은 A_n 와 B_n 로 각각 정의되며, [4]의 식 (2)의 관계에 의해 역시 랜덤 변수로 모델링된다. 위의 정의들을 이용하여, S_n 에 의해 발생하는 전체 도플러 주파수 $F_{D,n}$ 은 아래와 같이 정의 된다:

$$F_{D,n} = f_{T_{\max}} \cos A_n - f_{R_{\max}} \cos B_n. \quad (2)$$

최종적으로, 상기 기하학적 모델의 시변 채널 이득은 (2)에 의해 도플러 천이된 복소 지수함수들의 무한 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$h(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N e^{j(\theta_n + 2\pi F_{D,n} t)} \quad (3)$$

III. Oncoming 환경에서의 도플러 PSD 분석

식 (3)로부터 이론적인 도플러 PSD $S_{hh}(\nu)$ 의 해석가능한 수학적 해를 얻기 위해, [4]에서는 아래의 등가성질을 이용하였다:

$$S_{hh}(\nu) = f_{F_D}(\nu) \quad (4)$$

여기서 $f_{F_D}(\nu)$ 는 도플러 주파수 $F_{D,n}$ 의 PDF이다. $f_{F_D}(\nu)$ 를 얻기 위해, 먼저 [4]의 식 (3)에서 제안된 joint AoD-AoA PDF $f_{A,B}(\alpha, \beta)$ 를 (2)의 비선형 변환을 통해 joint Doppler-AoA PDF를 다음과 같이 얻었다:

$$f_{f_{D,B}}(\nu, \beta) = \frac{(x_T - x_R)^2}{A f_{T_{\max}}} \left| \frac{\csc^3(h_3(\nu, \beta) - \beta)}{1 - z^2(\nu)} \right| \times [\sin\{h_3(\nu, \beta)\} - m_c \cos\{h_3(\nu, \beta)\}] \times (\sin\beta - m_c \cos\beta) \mathbb{1}_D(\nu, \beta) \quad (5)$$

이때, D 는 $(F_{D,B})$ 의 표본공간, $h_3(\nu, \beta) = (-1)^{i-1} \arccos\{z(\nu, \beta)\}$, $z(\nu, \beta) = \{\nu + f_{R_{\max}} \cos\beta\} f_{T_{\max}}^{-1}$ 이다. 한편, $f_{f_D}(\nu)$ 는 식 (5)을 AoA β 에 대해 marginalize함으로써 아래와 같이 얻을 수 있다:

$$f_{f_D}(\nu) = \int_{\beta \in D} f_{F_{D,B}}(\nu, \beta) d\beta \quad (6)$$

마지막으로, (6)을 (4)에 대입하여, (3)의 도플러 PSD를 얻을 수 있다.

IV. 수치해석 및 시뮬레이션 결과

그림 2에서 식 (4)의 도플러 PSD를 Oncoming 환경에서 검증하기 위해 (3)의 시뮬레이션 결과로부터 추정된 도플러 PSD, 도플러 주파수의 히스토그램, 그리고 식 (6)의 도플러 주파수 PDF를 비교하였다. (3)으로부터 도플러 PSD의 추정을 위해 $N=10^4$ 개의 RSS를 생성하였고, 도플러 주파수의 히스토그램을 얻기 위해 $N=2 \times 10^5$ 개의 RSS를 생성하여 시뮬레이션 하였다. 이때 사용된 채널 파라미터는 $x_T = -200, x_R = 205, y_T = -9, y_R = 5, a_i = -239, b_i = 241, c_1 = 14, d_1 = 19, c_2 = -d_1, d_2 = -c_1$ (단위: m), $v_T = v_R = 104 \text{ km/h}, f_c = 5.9 \text{ GHz}$ 이다. 그림 2에서 관찰할 수 있듯이, 세 결과가 모두 일치하며, 이는 식 (4)와 (6)을 이용한 도플러 PSD 분석결과가 이론적으로 타당함을 의미한다.

그림 3은 식 (4)의 도플러 PSD와 논문 [6]의 IEEE 802.11.p 측정데이터와의 비교 결과이다. 비교에 사용된 데이터 셋은 "V2V Expressway Oncoming"이며, 해당 데이터는 고속도로에서 송수신 차량이 반대차선에서 상호 접근하는 경우에 측정되었다. 비교 결과는 제안된 모델이 측정

데이터와 유사한 도플러 PSD를 생성할 수 있음을 나타내며, 이는 RSS가 고속도로 Oncoming 채널의 시변특성에 중요한 역할을 함을 의미한다.

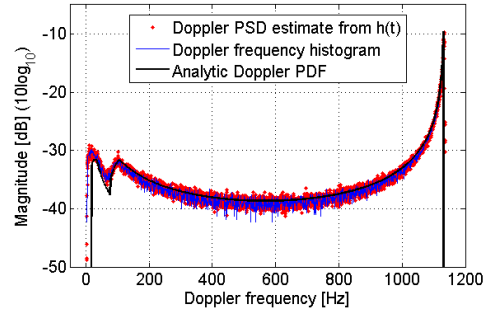


그림 2. $h(t)$ 로부터 추정된 도플러 PSD, 도플러 주파수 히스토그램, 도플러 주파수 PSD의 비교결과

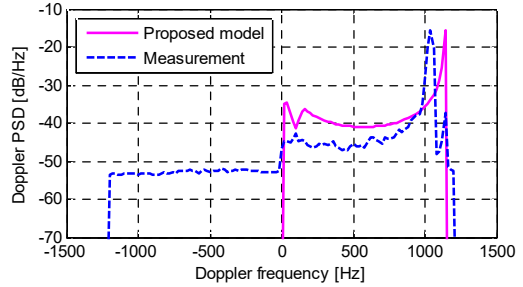


그림 3. IEEE 802.11.p 측정 데이터[5]와의 비교 결과

V. 결론

본 논문에서는 차량 간 통신에서, 두 송수신차량이 고속도로에서 상호 접근 주행하는 경우, 도로변 산란자에 의해 발생하는 도플러 PSD를 이론적으로 분석하고, 그 결과를 시뮬레이션을 통해 검증하였다. V2V 고속도로 Oncoming 환경에서의 측정 데이터와 비교 결과, 제안된 모델이 측정된 도플러 PSD와 유사함을 보였다. 본 연구 결과는 다양한 V2V통신 채널의 시변특성 분석 및 채널 시뮬레이터 제작에 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 광주과학기술원 전자전통화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] W. Knight. (2015). "Car-to-car communication: A simple wireless technology promises to make driving much safer." MIT Technology Review. [Online]. Available: <https://www.technologyreview.com/s/534981/car-to-car-communication> [Dec. 15, 2016]
- [2] L. Cheng, D.D. Stancil, and F. Bai, "A roadside scattering model for the vehicle-to-vehicle communication channel," IEEE J. Sel. Areas Commun. vol. 31, no. 9, pp. 449-459, Sept. 2013.
- [3] N. Avazov and M. Ptzold, "Design of wideband MIMO car-to-car channel models based on the geometrical street scattering model," Model. Simul. Eng., vol. 2012, Sep. 2012, Art. ID. 264213.
- [4] 유상조, 김유라, 김기선, "차량 간 통신환경을 위한 도로변 산란자 채널 모델," 2016년도 한국통신학회 하계종합학술발표회 논문집, vol. 60, 2016. 6, pp. 1505-1506.
- [5] G. Acosta-Marum and M. Ingram, "Six time- and frequency-selective empirical channel models for vehicular wireless lans," IEEE Veh. Technol. Mag., vol. 2, no. 4, pp. 4-11, 2007.