

차량 간 통신환경을 위한 도로변 산란자 채널 모델

유상조, 김유라, 김기선

광주과학기술원

{asapyoo, yural518, kskim}@gist.ac.kr

A Roadside Scattering Model for Vehicular-to-Vehicular Communication Channels

Yoo Sangjo, Kim Yura, Kim Ki-Seon

Gwangju Institute of Science and Technology

요약

차량 간 (vehicle-to-vehicle, V2V) 통신 환경에서, 전송된 신호는 송수신 단말의 높은 이동속도에 의한 급격한 시변 페이딩을 겪으며, 이는 V2V통신의 신뢰성을 저하시킨다. 이를 극복하기 위해서는, 적절한 채널 모델링과 해당 채널모델의 도플러 전력 스펙트럼밀도 (power spectral density, PSD) 의 특성 분석을 통해 어떻게 신호가 왜곡되는지에 대한 이해가 필수적이다. 본 논문에서는 V2V채널의 시변특성 분석을 위한 이차원 도로변 산란자 (roadside scatterer, RSS) 모델을 제안한다. 제안된 모델은 RSS가 도로 양옆의 사각형 영역 내 균등 분포함을 가정한다. 제안된 기하학적 모델로부터, 전파신호의 발산각과 수신각의 결합 확률밀도함수와 도플러 psd를 유도 및 분석 하였으며, 그 결과들을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. RSS모델의 이론적인 도플러 psd는 기존에 측정된 도플러 psd와 매우 유사한 특징을 가진다. 제안된 모델은 다양한 차량 간 통신 채널들의 시변특성 분석 및 채널 시뮬레이터 제작에 활용될 수 있다.

I. 서론

기존의 셀룰러 채널 환경과는 대조적으로, 차량 간 통신환경에서는 송수신 단말간의 최대 상대 속도가 60meter/sec에 이르며, 전송신호는 도플러 확산에 의한 급격한 시변 페이딩을 겪는다. 이러한 V2V 통신 시스템의 디자인, 최적화, 및 현실적인 성능 평가를 위해서는 해당 시변 채널 환경에 의해 신호가 어떻게 왜곡되는지에 대한 이해가 필수적이며, 이는 V2V 통신 채널의 적절한 모델링과 도플러 전력스펙트럼밀도 (power spectral density, PSD) 의 통계적 특성 분석을 통해 달성 가능하다.

V2V환경에서 수신된 신호는 가시선 성분, 도로위의 움직이는 차량에 의해 산란된 신호 성분, 그리고 도로변의 나무, 표지판, 혹은 빌딩 등과 같은 정적인 물체들에 의해 산란된 신호들로 구성되어 있다 [1]. 이때, 전체 채널 시변 특성은 송수신기 주변의 비정적인 차량보다는 정적인 도로변 산란자 (roadside scatterer, RSS) 들에 의해 더 큰 도플러 확산을 겪으며, 이들에 의한 도플러 PSD는 일반적으로 송수신기의 상대속도에 의한 도플러 주파수 및 최대 도플러 주파수 부근에서 높은 전력밀도를 갖는 독특한 "rabbit ears" 모양을 갖는다 [2]. 이와 같은 V2V채널의 특성을 분석하기 위해, [2]에서는 RSS를 도로의 좌우측 상의 두 선분 위에 균등 분포함을 가정하고 도플러 PSD모델을 제안하였다. 하지만 실제 RSS들은 도로 양측면의 넓은 공간에 걸쳐 분포하므로, 해당 모델은 실제적인 도플러 확산 모델링에 한계가 있다. 한편, [3]에서는 RSS들의 위치를 도로 양측면의 사각형 내의 균등 분포로 모델링 하고, 전파신호의 발산각 (Angle-of-departure, AoD)과 수신각 (angle-of-arrival, AoA)간의 통계적 독립을 가정하여 도플러 PSD를 분석하였다. 그러나 실제 전파환경에서는 AoD와 AoA간의 상관성이 존재하므로, 해당 모델은 실제 RSS에 의해 발생한 도플러 PSD의 특징을 설명하는 것이 불가능하다.

기존 RSS모델들의 단점을 개선하기 위해, 본 논문에서는 이차원 RSS 채널 모델을 제안한다. 제안된 모델은 RSS의 위치를 도로 양 옆의 사각형

영역에서 균등 분포함을 가정하며, AoD와 AoA간의 상관성을 고려한다. 제안된 모델로부터, AoD와 AoA의 결합 확률밀도함수 (joint probability density function, joint pdf) 를 closed-form으로 도출하고, 확률 변수 변환을 이용하여 정확한 도플러 PSD를 유도 및 그 특징을 분석한다.

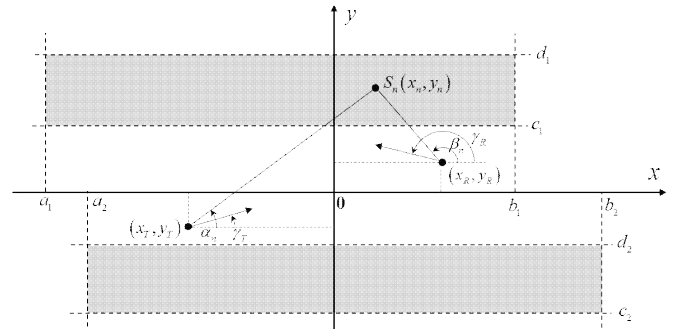


그림 1. 기하학적 도로변 산란자 모델

II. 기하학적 도로변 산란자 (RSS) 채널 모델

본 논문에서 제안하는 기하학적 도로변 산란자 채널 모델은 그림 1과 같다. 해당모델은 송신 신호가 수평방향으로만 전파함을 가정하는 이차원 모델이며, $\mathbf{0}$ 을 원점으로 가지는 xy 평면에서 정의된다. 이 때, x 축은 도로의 중앙선을 기준으로 한다. 송신기 (Tx)와 수신기 (Rx)는 (x_T, y_T) 및 (x_R, y_R) 에 위치하며, x 축을 기준으로 각각 γ_T 및 γ_R 의 방향과 v_T 및 v_R 의 속도로 이동한다. n 번째 도로변의 산란자 S_n 의 위치는 (x_n, y_n) ($n = 1, 2, \dots, N$)이고, 도로의 좌측 및 우측의 사각형 영역에 균등 분포함을 가정한다. 여기서, 각 사각형의 영역은 a_i, b_i, c_i, d_i 에 의해 제한된다 ($i \in \{1, 2\}$). 이 때, S_n 에 의해 생성된 신호의 AoD와 AoA는 α_n 와 β_n 로 각각 정의된다. S_n 의 위치 (x_n, y_n) 는 랜덤 변수 X_i, Y_i 로 모델링 되며,

각 랜덤변수의 pdf는 $f_{X_i}(x) = (b_i - a_i)^{-1}$ 와 $f_{Y_i}(y) = (d_i - c_i)^{-1}$ 로 정의된다. 단위면적당 산란자의 밀도는 균일하다고 가정할 때, X_i 와 Y_i 의 joint pdf는

$$f_{X_i, Y_i}(x, y) = C^{-1} \mathbf{1}_{D_i}(x, y), \quad i \in \{1, 2\} \quad (1)$$

으로 나타낼 수 있다. 이 때, $C = C_1 + C_2$, $C_i = (b_i - a_i)(d_i - c_i)$ 이며, $\mathbf{1}_{D_i}(x, y)$ 는 $\mathbf{1}_{D_i}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } (x, y) \in D_i \\ 0, & \text{if } (x, y) \notin D_i \end{cases}$ 으로 정의되는 표시함수이다. 여기서 $D_i = \{(x, y) : a_i \leq x \leq b_i \text{ and } c_i \leq y \leq d_i\}$ 이다.

III. AoD-AoA 결합 확률밀도함수 및 도플러 PSD 분석

그림 1에서 RSS들의 위치는 랜덤변수 X_i, Y_i 로 모델링 되므로, AoD α_n 와 AoA β_n 는 아래의 관계식을 이용하여 랜덤 변수 A 및 B 로 나타낼 수 있다:

$$A(B) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{Y_i - y_{T(R)}}{X_i - x_{T(R)}}\right), & \text{if } X_i > x_{T(R)} \\ \arctan\left(\frac{Y_1 - y_{T(R)}}{X_1 - x_{T(R)}}\right) + \pi, & \text{if } X_1 < x_{T(R)} \text{ and } Y_1 > y_{T(R)} \\ \arctan\left(\frac{Y_2 - y_{T(R)}}{X_2 - x_{T(R)}}\right) - \pi, & \text{if } X_2 < x_{T(R)} \text{ and } Y_2 < y_{T(R)} \end{cases} \quad (2)$$

식 (1-2)로 부터, 랜덤변수 변환을 통해 AoD와 AoA의 joint pdf를 아래와 같이 closed-form으로 나타낼 수 있다:

$$f_{A,B}(\alpha, \beta) = C^{-1} \mathbf{1}_Q(\alpha, \beta) \times \left| \csc(\alpha - \beta)^3 \{ (x_T - x_R) \sin \alpha - (y_T - y_R) \cos \alpha \} \right| \times \left| \{ (x_T - x_R) \sin \beta - (y_T - y_R) \cos \beta \} \right| \quad (3)$$

이때, $Q = \bigcup_{j=1}^8 Q_j$ 이며, Q_j 의 bound는 A, B, X_i, Y_i 의 관계로부터 얻을 수 있다.

Tx 및 Rx의 이동성과 신호의 랜덤 AoD 및 AoA에 의한 전체 도플러 주파수는 다음과 같이 정의된다:

$$f_D = f_{T_{\max}} \cos(A - \gamma_T) + f_{R_{\max}} \cos(B - \gamma_R) \quad (4)$$

이 때, $f_{T_{\max}} = v_T/\lambda$, $f_{R_{\max}} = v_R/\lambda$ 이다. 식 (3)에서 알 수 있듯이, AoD와 AoA는 상호 의존적인 랜덤 변수이므로, f_D 역시 랜덤 변수이다. 한편, 가시선 경로가 존재하지 않는 채널의 정규화된 도플러 PSD $S(v)$ 와 $f_{f_D}(v)$ 의 관계는 아래와 같다 [3]:

$$S(v) = f_{f_D}(v). \quad (5)$$

따라서, RSS모델의 $f_{f_D}(v)$ 를 구하면, 채널의 정규화된 도플러 PSD를 얻을 수 있다. 도플러 주파수의 pdf $f_{f_D}(v)$ 는 식 (3-4)를 이용한 랜덤변수 변환으로 얻은 joint pdf $f_{f_D, B}(v, \beta)$ 를 B 에 대해 marginalize함으로써 아래와 같이 얻을 수 있다:

$$f_{f_D}(v) = \sum_{m \in I, n \in J} \int_{B_{v_n}(v)}^{B_{v_m}(v)} f_{f_D, B}(v, \beta) d\beta, \text{ if } v_{c_k} < v < v_{c_{k+1}} \quad (6)$$

이때, 식 (6)은 $k = 1, 2, \dots, K-1$ 인 piecewise 함수이다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안된 joint AoD-AoA pdf 및 도플러 psd 수식을 검증하

기 위해 5×10^5 개의 RSS를 생성하여 시뮬레이션을 하였고 이를 수식 (3-4)와 비교하였다. 이때 사용된 채널 파라미터는 $a_i = -130, b_i = 100, c_1 = 20, d_1 = 70, c_2 = -70, d_2 = -20, x_T = 50, x_R = 50, y_T = y_R = 0$ (단위: m), $f_{T_{\max}} = f_{R_{\max}} \approx 546.3\text{Hz}$ 이다. 그림 2와 3에서 관찰할 수 있듯이, 제안된 joint pdf와 Doppler PSD는 시뮬레이션 결과와 거의 일치함을 보였으며, 이는 제안된 수식들이 이론적으로 타당함을 뒷받침한다. 한편, 그림 3에서 도플러 PSD는 송수신기의 상대속도에 의한 도플러 주파수 ($v = 0\text{Hz}$) 및 최대 도플러 주파수 인근에서 높은 전력밀도를 가짐을 관찰할 수 있으며, 이는 [2, 그림 8,9]의 suburban과 rural 지역에서 측정된 도플러 PSD의 특징과 매우 유사하다.

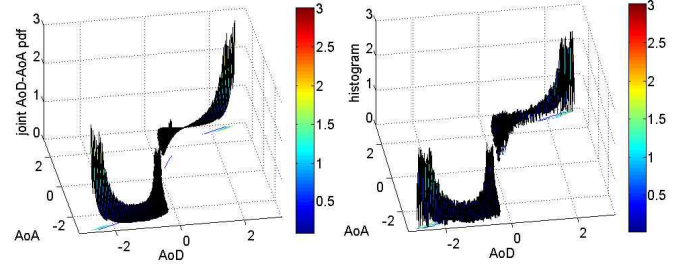


그림 2. 식 (3)의 joint pdf (좌); 정규화된 히스토그램 결과 (우).

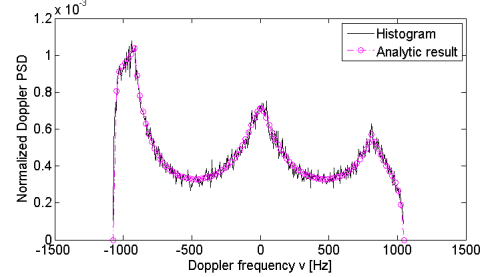


그림 3. 식 (6)의 도플러 PSD와 히스토그램 비교.

V. 결론

본 논문에서는 차량 간 통신 환경 채널의 시변특성 분석을 위해 이차원 RSS모델을 제안하였다. 제안된 기하학적 모델로부터, AoD-AoA의 joint pdf와 도플러 PSD를 유도 및 분석 하였으며, 그 결과들을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. RSS모델의 도플러 PSD분석결과, V2V채널에서 측정된 도플러 PSD의 특징과 매우 유사함을 보였다. 제안된 모델은 다양한 V2V 통신 채널의 시변특성 분석 및 채널 시뮬레이터 제작에 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 광주과학기술원 전자전통화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] J. Karedal, et. al., "A geometry-based stochastic mimo model for vehicle-to-vehicle communications," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 8, no. 7, pp. 3646 - 3657, July 2009.
- [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. Patzold, "A geometric street scattering channel model for car-to-car communication systems," in Proc. ATC 2011, Da Nang, Vietnam, pp. 224 - 230, Aug. 2011.