

論文・解説

20

車車間通信のLCR・AFDモデルの開発 Development of the LCR・AFD Model of the V2V

山田 秀行*¹ 強矢 昌宏*² タン ザ カン*³
Hideyuki Yamada Masahiro Suneya Gia Khanh Tran
荒木 純道*⁴
Kiyomichi Araki

要 約

車車間通信：V2V (Vehicle to Vehicle Communication) による安全運転システムの性能を向上するには、受信信号特性を高精度に把握し、通信品質を高めていくが必要になる。時々刻々と移動しながら行うV2Vの動的な品質指標としては、単位時間当たりに受信信号レベルが閾値を下回る回数として定義されるLCR (Level Crossing Rate) と、受信信号レベルが閾値を下回る平均持続時間として定義されるAFD (Average Fade Duration) が重要となるが、実走行環境下におけるV2V特有のLCR・AFD推定モデルは確立されていない。本稿では、V2VのLCR・AFDをシミュレーションとフィールド実験により検証し、走行環境に依存する到来波角度プロファイルに着目することで、LCR・AFDを高精度に推定可能なモデルを開発した。これにより、目的とするLCR・AFDを達成するために必要となる信号レベル：SNR (Signal to Noise Ratio) の設計精度を従来に比べ3dB程度向上し、誤差1dB以内に行えることを確認した。

(第13回ITSシンポジウム2015投稿論文を一部編集し掲載、特定非営利活動法人ITS Japan許諾済)

Summary

To realize a safety driving system by V2V, it is essential to understand signal propagation properties for the purpose of improving communication performance. As indices of performance, LCR and AFD are two important factors to be evaluated in V2V. But, LCR・AFD estimate model peculiar to V2V under the run environment is not established. In this article, we theoretically derive LCR・AFD of the V2V to enable the estimation of LCR・AFD with high accuracy using the angle of arrival profile in the established model. Then, it is able to determine design parameter necessary to realize desired LCR・AFD within an error of 1dB. This is equivalent to 3dB improvement as compared with the conventional.

1. はじめに

交通事故低減を目的としてV2Vや路車間通信：V2I (Vehicle to Infrastructure Communication) などを活用した協調型安全運転支援システムの市場導入へ向けた動きが加速している。国内の700MHz帯V2Vシステムでは、出会い頭交差点など代表的な走行シーンに対して、事故防止支援を成立させるために必要な支援開始タイミングを元に、通信品質・通信エリア要件が共通ガイドライン⁽¹⁾として設定されている。しかし、実用システムではあらゆる走行環境でも要件を満足できる高いロバスト性が必要になる。一方、V2Vの電波伝搬特性は走行環境により大きく変動

する。そのため、走行環境ごとの受信信号特性を高精度に把握し、環境変化を考慮した通信品質設計が重要となる。これまでも、V2Vにおける平均受信電力特性^{(2),(3)}、シャドーイング特性^{(4),(5)}、フェージング特性^{(6),(7)}などの推定モデルは提案されているが、これらでは車両の速度・移動方向など動的挙動が考慮されていないため、実走行条件に適合した通信品質向上設計は困難である。車両の動的挙動まで考慮すると、受信信号の時間変動特性を把握する必要がある。この特性を表す指標としてLCRとAFDがある。これらを把握することで、走行環境変化に対する静的な特性変動に加え、走行環境ごとに、速度変化に伴い変動する通信品質特性の把握も可能となり、より信頼性の高いシステ

*1~2 技術研究所
Technical Research Center

*3~4 東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

ム設計が可能となる。

2. LCR・AFDモデル化アプローチ

研究開発が先行しているセルラー系通信分野では、LCRとAFDは式(1)~(4)のようにモデル化されている⁽⁸⁾。式(1)、(2)はLCRを表し、(1)はフェージング特性を、一様に乱れた分布とされるレイリー分布とした式で、(2)は一様な乱れから外れた分布も広く表現できる仲上m分布とした場合の式である。式(3)、(4)はAFDを表し、(3)はフェージング特性をレイリー分布とした式、(4)は仲上m分布とした場合の式である。

$$LCR_r(\rho) = \sqrt{2\pi}f_d\rho \exp(-\rho^2) \quad (1)$$

$$LCR_n(\rho) = \sqrt{2\pi}f_d \frac{m^{m-\frac{1}{2}}}{\Gamma(m)} \rho^{2m-1} \exp(-m\rho^2) \quad (2)$$

$$AFD_r(\rho) = \frac{\exp(\rho^2)-1}{\sqrt{2\pi}f_d\rho} \quad (3)$$

$$AFD_n(\rho) = \frac{\Gamma(m, m\rho^2) \exp(m\rho^2)}{\sqrt{2\pi m^{2m-1}} f_d \rho^{2m-1}} \quad (4)$$

ここで、 f_d は速度 v と通信に用いる電波の波長 λ によって決まる最大ドップラー周波数 ($f_d = v/\lambda$ [Hz])、 m は仲上m分布におけるフェージングの度合いを示すパラメータであり、 $m=1$ のときがレイリー分布に相当する。 ρ は受信振幅 A を振幅のRMS (Root Mean Square) で正規化したもの ($\rho = A/\sqrt{A^2}$)、 $\Gamma(\cdot)$ はガンマ関数、 $\Gamma(\cdot, \cdot)$ は不完全ガンマ関数である。更に、式(1)~(4)では到来波角度プロファイルが一様分布であることも前提としている。一方、V2Vでは見通し外道路での到来波角度プロファイルは一様分布にはならず、Fig. 1に示すような2つのピークを持つような偏った分布となり、このモデルは式(5)のように表せることを著者らが報告している⁽⁹⁾。

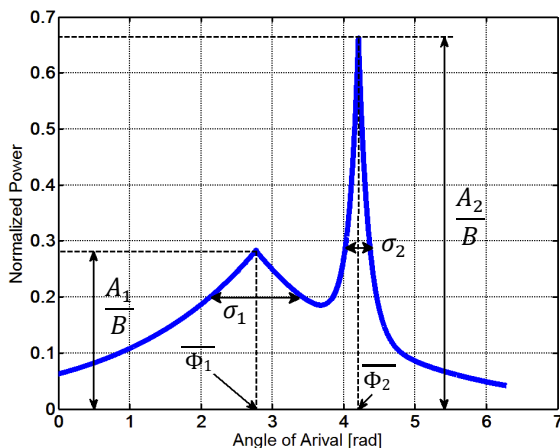


Fig. 1 Conception Diagram of the Parameter of the Equation (5)

Fig. 1において A_1/B は第1ピークの大きさ、 A_2/B は第2ピークの大きさ、 σ_1 、 σ_2 は各山の角度拡がり、 Φ_1 、 Φ_2 は各山の中心角度を表している。

$$S(\phi) = \frac{A_1 \exp\left(-\frac{\sqrt{2}|\phi - \Phi_1|}{\sigma_1}\right)}{B} + \frac{A_2 \exp\left(-\frac{\sqrt{2}|\phi - \Phi_2|}{\sigma_2}\right)}{B}$$

$$B = \int_0^{2\pi} \left[A_1 \exp\left(-\frac{\sqrt{2}|\phi - \Phi_1|}{\sigma_1}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{\sqrt{2}|\phi - \Phi_2|}{\sigma_2}\right) \right] d\phi \quad (5)$$

式(5)の各パラメータは環境に依存して変化するため、到来波角度プロファイルが一様分布として表された式(1)~(4)から推定したLCR・AFDでは、走行環境条件により推定精度がばらつく問題があると考えた。そこで、任意の到来角度プロファイルをパラメータに考慮できることを課題とし、LCR・AFDモデルの開発に取り組んだ。

3. V2VにおけるLCR・AFDの検証

シミュレーションとフィールド実験により、V2VのLCR・AFDを検証した。シミュレーションには、電波伝搬特性を幾何光学近似に基づいて光線の軌跡上の反射、回折、透過、距離減衰、干渉などを計算するレイトレース手法を用いた。

3.1 検証条件

送信車両は停止し、受信車両が移動しているケースについて、速度とLCR・AFDの関係につき検証した。Fig. 2、3に示すように送信車両の位置と受信車両の移動軌跡を変えた2種類の環境を設定し検証を行った。受信車両の移動速度は、シミュレーションでは、環境Aで30km/h、60km/h、環境Bで10km/h、30km/hのそれぞれ2水準とし、フィールド実験では、環境Aで10km/h、20km/h、30km/hの3水準、環境Bで10km/h、15km/hの2水準とした。その他の条件はTable. 1に示すとおりとした。シミュレーションおよびフィールド実験によって得られた距離に対する受信電力を20mごとに分割することで、電波伝搬特性の定常性を確保した条件でLCR・AFDの検証を行った。

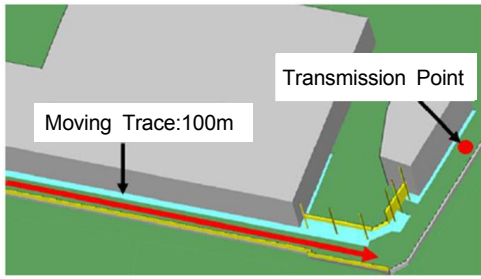


Fig. 2 Environment A

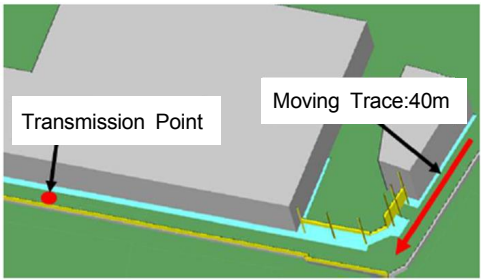


Fig. 3 Environment B

Table. 1 Inspection Condition

Item	Specification
Center Frequency	760MHz
Band Width	10MHz
Antenna Type	Monopole
Antenna Length	1/4 λ
Polarization	Vertical Polarized Wave No Directivity in Horizontal Plane

3.2 検証結果

シミュレーションによって得られた環境AのLCR・AFDの結果例をFig. 4に、環境Bの結果例をFig. 5に示す。Fig. 4(a), Fig. 5(a)より、LCRは速度に比例して増加していることが分かる。一方、Fig. 4(b), Fig. 5(b)より、AFDは速度に反比例して減少していることが分かる。これらは、式(1)~(4)に示すように、速度により変化する f_d に起因していると考えられる。また、Fig. 4とFig. 5を比較すると、同じ速度であっても走行環境が異なることでLCR・AFDの ρ に対する特性（傾き）が変化することも分かる。

次に、フィールド実験結果をFig. 6, 7に示す。フィールド実験結果でも、ばらつきは大きいですがシミュレーション結果と同様の傾向が得られた。実験結果がシミュレーション結果よりもばらつくのは、走行速度の変動が原因と考えられる。低速度ほど一定速度でのコントロールは難しいため変動は大きくなる傾向となる。また、 ρ の範囲がシミュレーションに対して狭くなっているのは、シミュレーションでは車体を考慮していないことに加え、実験では、フェ

ージング特性が走行環境により異なっていることなどが原因と考えられる。

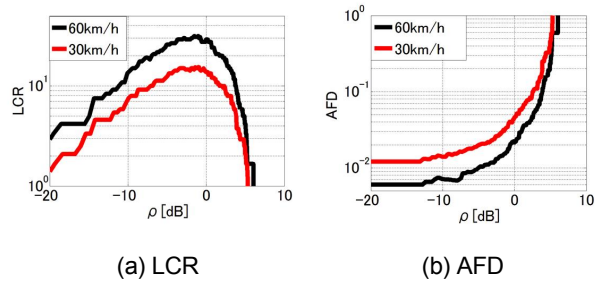


Fig. 4 Simulation Result of Environment A

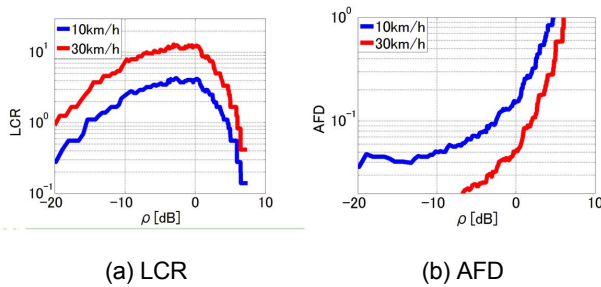


Fig. 5 Simulation Result of Environment B

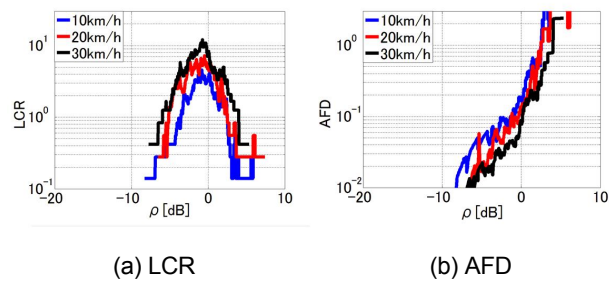


Fig. 6 Experimental Result of Environment A

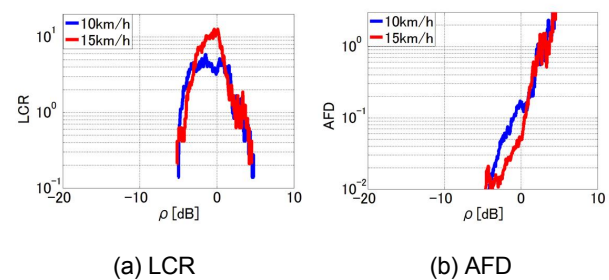


Fig. 7 Experimental Result of Environment B

4. V2Vへの従来モデル適用時の課題

3章で検証したLCR・AFDを式(1)~(4)に示す従来モデルと比較することで従来モデルの有用性を検証した。式(2), (4)の中の仲上m分布におけるmパラメータはシミュレーションおよびフィールド実験結果の受信信号強度から最尤推定⁽¹⁰⁾にて求めた値を用いた。車速30km/hにおける、

環境Aでのシミュレーション結果とモデル式の結果との比較をFig. 8に、環境Bでの比較をFig. 9に示す。Fig. 8, 9より、フェージング特性をレイリー分布と仮定したモデル(式(1), (3))での結果は、シミュレーション結果に対して傾きが異なっていることが分かる。一方、仲上m分布と仮定したモデル(式(2), (4))では、傾きがシミュレーション結果と良く一致している。これらのフェージングモデルによる差はLCRの方がAFDよりも顕著に表れている。以上から、V2Vでは、フェージング特性を仲上m分布で表現する方が有用であるといえる。

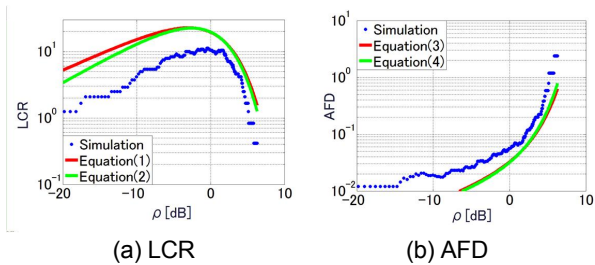


Fig. 8 Simulation Result of Environment A

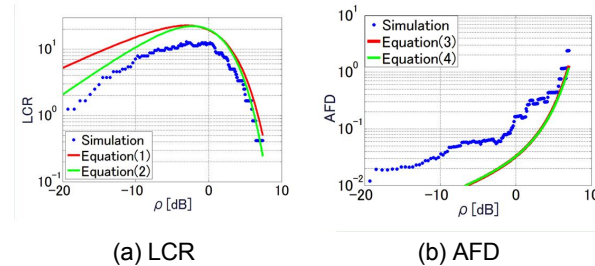


Fig. 9 Simulation Result of Environment B

また、従来モデル式(1)~(4)から求まる全ての結果において、シミュレーション結果に対するオフセットがあり、その量は環境A, Bで異なっている。この原因は、従来モデルでは到来波角度プロファイルを一様分布と仮定しているが、V2V環境では一様分布に従っていないことにあると考えられる。また、環境によりオフセット量が異なるのは、到来波角度プロファイルが環境により変化するためと考える。また、従来モデルから求まる結果とフィールド実験結果を比較しても、Fig. 10, 11に示すようにシミュレーション結果と同様の傾向となることが分かった。

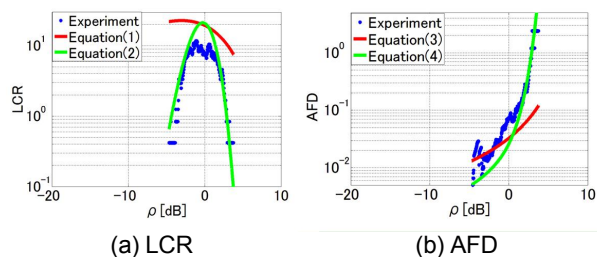


Fig. 10 Experimental Result of Environment A

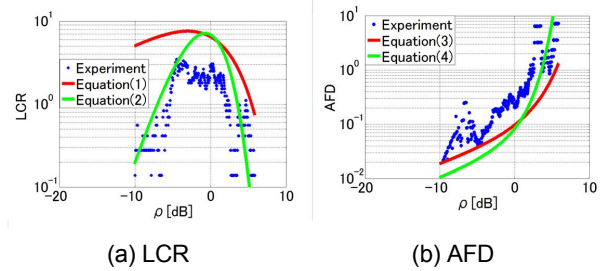


Fig. 11 Experimental Result of Environment B

5. 到来波角度プロファイルを考慮した LCR・AFDモデル

任意の到来波角度プロファイルを考慮できるモデル開発にあたっては、式(6)に示すLCRモデル⁽¹¹⁾を参照した。

$$LCR(\rho) = pdf(\rho) \frac{\sqrt{|r_2''(0)|}}{\sqrt{8\pi m}} \tag{6}$$

ここで、 $r(t)$ は自己共分散、 $pdf(\rho)$ は ρ の確率密度関数を表す。式(6)は受信信号強度の時間変動特性 $R(t)$ と、 $R(t)$ の時間微分 $R'(t)$ が独立の場合に成立することが証明されている⁽¹¹⁾。また、到来波の自己共分散は式(7)で表される⁽¹²⁾。

$$r(t) = \int_0^{2\pi} S(\phi) \exp(j2\pi f_d t \cdot \cos(\phi)) d\phi \tag{7}$$

ここで、 $S(\phi)$ は到来波角度プロファイル、 t は時間を表す。式(6), (7)の2つの式を展開することでLCRを到来波角度プロファイルで表現できる。しかし、式(6)が成立するには $R(t)$ と $R'(t)$ が独立であることが前提となるため、V2Vにおいて $R(t)$ と $R'(t)$ の独立性につき、以下のように検証した。LCRの定義式は式(8)で示される。

$$LCR(R) = \int_{-\infty}^{\infty} R' pdf(R, R') dR' \tag{8}$$

ここで、 $pdf(R, R')$ は $R(t)$ と $R'(t)$ の結合確率密度関数を表す。 $R(t)$ と $R'(t)$ が独立であれば、式(8)は式(9)に変形できる。

$$LCR(R) = pdf(R) \int_{-\infty}^{\infty} R' pdf(R') dR' \tag{9}$$

式(9)より $R(t)$ と $R'(t)$ が独立なら、 $LCR(R)$ と $pdf(R)$ は比例関係にあることが分かる。つまり $LCR(R)$ 、および $R(t)$ の正規化累積確率分布cdfが一致することを意味する。そこで、シミュレーションおよびフィールド実験結果の $LCR(R)$ と $R(t)$ のcdfについて検証

した。検証には、 $R(t)$ と対の関係にある $\rho(t)$ について行った。結果をFig. 12に示す。

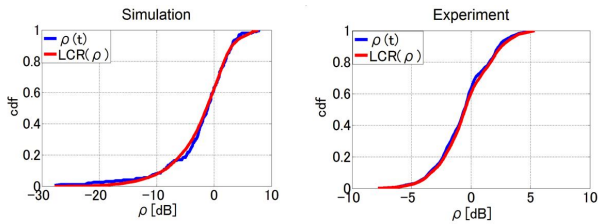


Fig. 12 cdf of LCR(ρ) and ρ(t)

Fig. 12より、シミュレーションおよびフィールド実験結果のLCR (R) と $R(t)$ のcdfは良く一致していることが分かる。従って、V2V見通し外環境での $R(t)$ と $R'(t)$ は独立であるといえる。

以上、V2Vにおける $R(t)$ と $R'(t)$ の独立性が証明できたことから式(6)は V2V にも適用可能であることが分かった。式(6)に(7)を代入し展開することで式(10)のように整理できる。これが、任意の到来波角度プロファイルを考慮できる V2V の LCR モデルとなる。また、AFD は定義より式(11)のように表される。

$$LCR(\rho) = pdf(\rho)2\pi f_d \sqrt{2\{\eta - (\zeta)^2\}} \frac{1}{\sqrt{8\pi m}} \quad (10)$$

$$\eta = \int_0^{2\pi} S(\phi) \cos^2(\phi) d\phi$$

$$\zeta = \int_0^{2\pi} S(\phi) \cos(\phi) d\phi$$

$$AFD(\rho) = \frac{cdf(\rho)}{LCR(\rho)} \quad (11)$$

式(10), (11)から LCR・AFD を求めるためには、参考文献(9)に示されているレイトレースシミュレーションによる到来波角度プロファイル検証手法を用い、以下のように $S(\phi)$ を求めた。まず、微小エリア内に規則配置した観測点における受信信号強度と位相情報を式(12)に適用し、この微小エリア内の各観測点における $S_i(\phi)$ を導出した。

$$S_i(\phi) = \left| \int_{-\frac{x}{2}}^{\frac{x}{2}} \int_{-\frac{y}{2}}^{\frac{y}{2}} H_i(x, y) \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}(x\cos\phi + y\sin\phi)\right) dx dy \right|^2 \quad (12)$$

ここで、 $H(x, y)$ は各観測点の座標 (x, y) における複素振幅を表す。微小エリアは 2m 四方とし、その中に $33 \times 33 = 1089$ 点の観測点を配置した。LCR・AFD を導出する 20m 区間には 10 個の $S_i(\phi)$ があり、これらを

平均することで式(10), (11)に適用する $S(\phi)$ とした。本手法により導出した $S(\phi)$ の一例を Fig. 13 に示す。角度軸は、受信車両の進行方向を 0rad とし、反時計回りに角度が増加するように設定した。

上記手法により決定した $S(\phi)$ を式(10), (11)に代入することで LCR・AFD を導出した。環境 A, 車速 30km/h の結果を Fig. 14 に、環境 B, 30km/h の結果を Fig. 15 に示す。

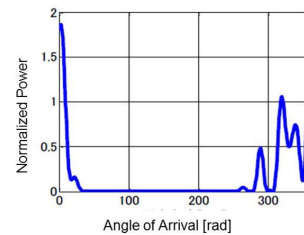


Fig. 13 Incoming Wave Angular Profile

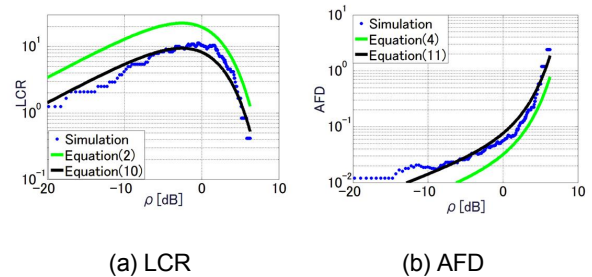


Fig. 14 Inspection Result of Environment A

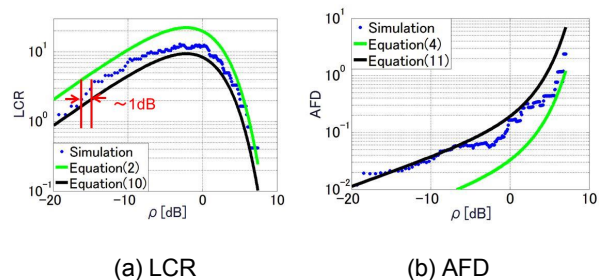


Fig. 15 Inspection Result of Environment B

Fig. 14, 15より、式(10), (11)の特性では、式(2), (4)で発生していたシミュレーション結果に対する上下のオフセットが小さくなり、シミュレーション結果の再現精度が高いことが分かる。この定量的検証のため、目的のLCRおよびAFDを実現するために必要となる ρ の値について比較した。式(2), (4)のモデルではシミュレーション結果に対して、3~5dBの差があったが、式(10), (11)では、おおむね1dB以下であり、高い精度が得られることが分かった。一方、式(10), (11)を用いても、環境AとBではシミュレーション結果との差の程度が異なる。これは、式(10),

(11)に適用した $S(\phi)$ の精度に起因したものと考える。今回は、20m区間における $S(\phi)$ は定常的であるという前提を置き、20m区間の平均的な $S(\phi)$ を用いているが、フィールド実験環境では20m区間を移動する間にも $S(\phi)$ の性質が変化するような非定常性があることが原因と考えられる。

6. まとめ

V2VにおけるLCR・AFDは車速だけでなく、走行環境によっても変動することをシミュレーションおよびフィールド実験により明らかにした。走行環境により変動する原因は、到来波角度プロファイルが変化することであると考える。任意の到来波角度プロファイルを考慮できるLCR・AFDのモデリング手法を構築した。開発したモデルを適用することで目的とするLCR・AFDの実現に必要な受信信号振幅 ρ [dB]を誤差1dB程度の精度で設計できることを確認した。今後は、本モデルを任意の走行環境に適用可能とすることで、実走行条件に適合性の高い安全運転支援サービスの実現に貢献していきたい。

参考文献

- (1) 国土交通省自動車局先進安全自動車推進検討会：先進安全自動車 (ASV) 推進計画報告書, pp.89-184 (2011)
- (2) 伊藤ほか：車々間通信環境における見通し内伝搬損失推定, 信学技報, A・P2006-126 (2007)
- (3) 伊藤ほか：車々間通信環境における見通し外伝搬損失推定, 2008信学総大A, B1-1-61 (2008)
- (4) 伊藤ほか：周辺車両が車車間伝搬損失特性に及ぼす影響に関する一検討, 信学論, J94-B-3, pp.445-467 (2011)
- (5) 山口ほか：車車間通信におけるNLOS交差点道路環境でのパス遮蔽確率推定, 2009信学総大, B-1-23 (2009)
- (6) M.Suneya et al. : Fading Characteristic Modeling of V2V Communication at 700MHz Band and the System Margin Design, ITS World Congress2013 (2013)
- (7) I.Sen et al. : Vehicle-Vehicle Channel Models for the 5-GHz Band, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 9, Issue 2, pp.235-245 (2008)
- (8) Ali Abdi et al. : Comparison of the level Crossing Rate and Average Fade Duration of Rayleigh, Rice, and Nakagami Fading Models with Mobile Channel Data, IEEE-VTS Fall VTC 2000. 52nd, 1850-1857 vol.4 (2000)
- (9) K.Matsumoto et al. : Angular Profile Modeling of V2V Communications, 信学技報, 2014-1-SR (2014)
- (10) S.Oguchi et al. : Performance Evaluation Method for Body Area Networks Based on Nakagami-m Channel Simulation, KJMW2011 FR2-5-1, 10-11 (2011)
- (11) N.Youssef et al. : Fade Statistics in Nakagami Fading Environments, IEEE 4th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings, vol.3, pp.1244-1247 (1996)
- (12) A.Goldsmith : WIRELESS COMMUNICATIONS, Cambridge University Press (2005)

■ 著 者 ■



山田 秀行



強矢 昌宏



タン ザ カン



荒木 純道