

特集：ITS 世界会議

23

車車間通信性能予測モデリング手法の確立

Establishment of Vehicle-to-Vehicle Communication Performance Prediction Modeling Techniques

山田 秀行*1	強矢 昌宏*2	奥木 友和*3
Hideyuki Yamada	Masahiro Suneya	Tomokazu Okugi
山本 雅史*4	荒木 純道*5	タン ザカン*6
Masashi Yamamoto	Kiyomichi Araki	Gia Khanh Tran

要約

任意の走行環境に対して、ロバスト性の高い車車間通信システムを実現するためには、走行環境特有の信号強度変動特性（フェージング特性）を把握し、十分なシステムマージンを確保できる受信機感度やゲインを設計する必要がある。今回、市街地見通し外交差点環境を対象に、通信性能予測モデリング手法を開発した。走行環境のフェージング特性を仲上-m 分布によりモデル化することで、達成すべき通信性能に必要な SN 比を精度よく予測し、システムマージンを精度よく設計可能とした。

Summary

In order to realize the vehicle-to-vehicle communication system with high robustness for any running environment, it is necessary to grasp signal strength variation characteristics of the driving environment-specific (fading characteristics), and to design the gain and receiver sensitivity that ensures a sufficient system margin. This time, we have developed a communication performance predictive modeling techniques for urban NLOS intersection environment. Through the modeled by Nakagami-m distributed fading characteristics of the driving environment, we made it possible to predict accurately the SN ratio required communication performance, and to design a high accuracy system margin.

1. はじめに

交通事故削減を目的に、車車間通信による安全運転支援システムの実用化と普及促進へ向け、官民連携で取り組まれている。車車間通信システムに必要な通信性能及び通信エリアは、個々のサービス要件から定められている⁽¹⁾。見通し外交差点での出会い頭発進待機支援サービス要件例をTable 1に示す。

Table 1 One Cases of V2V (Vehicle to Vehicle) Service Requirement

Service Situation	Anti-Collision at Intersection Service
Target Vehicle Maximum Speed	70km/h
Communication area length	94.7m (10m + 84.7m)
Requirement PER (max)	5%

ロバスト性の高い車載システムとするには、通信性能及び通信エリア要件を満足するために必要となる平均 SNR (Signal Noise Ratio) を精度よく予測して、システムマージンを十分確保する必要がある。官民連携活動で検討された回線設計例⁽²⁾ (Table 2) によると、システム許容伝搬損失を求める際に必要なフェージングマージンには、実測結果から得られた固定値を使用し、都市部、市街地、郊外など代表的な走行環境の平均伝搬損失は、送受信車両間の距離や交差点形状から平均伝搬損失を推定する方法として提案された「伊藤・多賀モデル」⁽³⁾ により見積もられている。通信システムマージンはシステムの許容伝搬損失と環境ごとの平均伝搬損失の差で表される。回線設計例⁽²⁾ によれば、都市部、郊外のシステムマージンが10dB弱確保できているのに対し、市街地では1.7dB と少なく、仮に、建物配置や交通状況などでフェージング特性が想定より悪化することがあれば、必要

*1~4 技術研究所
Technical Research Center

*5, 6 東京工業大学
Tokyo Institute of Technology

な通信性能を満足できなくなることも考えられる。Fig. 1に示すように、システムマージン確保のための通信システム設計を行うには、走行環境の平均伝搬損失と所要の通信性能達成に必要な平均SNRを精度よく予測する必要があり、そのためには、走行環境のフェージング特性を正確に把握する必要がある。今回、実際の市街地交差点での出会い頭事故防止支援サービスを対象に通信性能予測モデル及びフェージング特性モデルを検討し、シミュレーションとフィールド実験により、フェージング特性モデルの再現精度と平均SNR予測精度を検証した。

Table 2 Line Design Example (Non Line of Sight Intersection)

Environment		City	Urban	Suburbs
Fading Margin	dB	6.3	6.8	5.8
Require C/(I+N) @QPSK/100Byte	dB	4.0		
Receiving Sensitivity	dB	-90.1		
Acceptable propagation loss	dB	99.0	98.5	99.5
Distance	m	105(10+95)		
Propagation Loss (Estimate)	dB	89.2	96.8	91.6
System Margin	dB	9.8	1.7	7.9

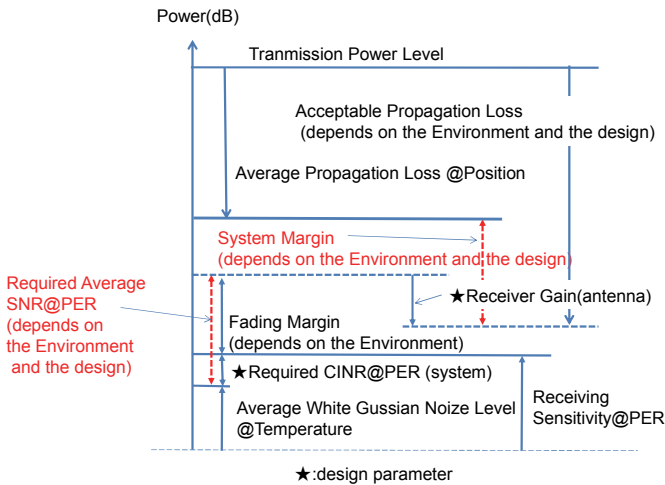


Fig. 1 Outline of Power Level

2. 車車間通信性能予測モデル

車車間通信システムでは、運転支援サービスコンセプトを基に、ドライバの反応時間や検知対象車両の上限速度などを考慮した通信エリアサイズと通信性能要件が規定されている⁽¹⁾。通信性能の指標は、通信エリア内の対象車両から送信された情報を受信した際のエラー度合いを示すパケットエラー率PER (Packet Error Rate) で

定義され、5%以下とすることが必要とされている。

また、平均SNRと平均PERの関係は式(1)で示される。

$$\overline{PER}(\bar{\gamma}) = \int_0^{\infty} PER(\gamma) \times pdf(\gamma|\bar{\gamma}) d\gamma \quad (1)$$

左辺の \overline{PER} は平均PERを表し、 $\bar{\gamma}$ は平均SNRを表している。右辺の $PER(\gamma)$ はホワイトガウスノイズ環境下でのSNRとPERの関係を表す関数で、変調方式、パケット構成、誤り訂正方式など通信機の伝送方式により決まる。ここで所要PERを達成するために必要となるSNRは通信機の伝送効率を表す指標である「搬送波レベル対干渉・雑音比」CINR (Carrier to Interference and Noise Ratio) に相当し、回線設計例⁽²⁾ (Table 2) では「Require C / (I+N)」として示され、無線機の受信感度に影響する。また、 $pdf(\gamma|\bar{\gamma})$ は受信信号SNRの空間分布を確率密度関数で表したもので電波伝搬特性におけるフェージング特性に相当する。式(1)から求まる所要平均PERを達成するために必要な平均SNRとCINRの差がフェージングマージンに相当する。受信感度、フェージングマージン、及びゲインなどから求まるシステムの許容電力損失と実環境下で予測される平均電力損失との差がシステムマージンであり、システムマージンが0dB以上ないと通信システムとして成立しない。

以上より、システムマージンを確保するためには、環境の平均伝搬損失と共に、伝送特性と伝搬特性から平均SNRを把握しシステムの許容損失を精度高く設計する必要がある。車車間通信システムの変調方式は、無線LANなどで一般的に使われているOFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) であり、伝送特性に関しては参照可能な知見が豊富であるのに対し、車車間通信サービス環境特有の伝搬特性については、平均伝搬損失予測モデルに関する報告事例⁽³⁾はあるが、700MHz帯車車間通信のフェージング特性モデルに関する検討事例は見当たらない。今回、日本における実用化優先度の高い代表的なサービスとして、見通し外交差点出会い頭発進待機支援サービスを対象に、フェージング特性モデルを検討し、シミュレーションとフィールド実験により再現精度を検証した、以下、その結果につき述べる。

3. フェージング特性モデル

3.1 フェージング特性モデルの検討

送受信車両間の距離による平均電力損失変動が時間空間的にマクロな変動であるのに対し、フェージング特性とは、送受信車両間の建物、路側構造物、周辺走行車両などによる多重反射波が複雑に干渉した結果発生する、時間空間的にミクロな信号強度変動特性のことである。このミクロな変動特性は信号強度の統計的分布特性として確率密度関数pdfで表現される。基地局と移動局関係での陸上移動体通信における見通し外通信では、平均値

が一定とみなせる狭い範囲での受信レベルの分布特性は、位相関係が全方位にわたって無関係かつ定常状態の分布に相当するレイリー分布に従うとされている⁽⁴⁾。しかし、車車間通信では、送受信アンテナが共に低く、相互に移動していることから、場合によっては分布特性がレイリー分布から外れる可能性も指摘されている⁽⁶⁾。日本における700MHz帯車車間通信のフェージング特性も、交差点の形状、建物配置や送受信車両の位置関係によっては、フェージング特性が変動する可能性があるとして仮定し、レイリー分布を含み、より広く分布特性を表現できる伸上-m分布⁽⁶⁾ (式(2))まで拡張し、フェージング特性のモデル化を行った。

$$pdf(\gamma) = \frac{m^m}{\gamma^m \Gamma(m)} \gamma^{m-1} \exp\left(-\frac{m}{\gamma}\right) \quad (2)$$

$\Gamma(m)$: ガンマ関数

伸上-m分布は式(2)中のパラメータ“m”の値(以下mファクタと呼ぶ)により、電波伝搬の結果生じるフェージングの度合いを広く表現でき、m=1の場合がレイリー分布となる。m>1の場合は、見通し関係のような強い直接波成分のある分布に相当し、フェージングの度合いは、レイリー分布よりも緩いと定性的には理解できる。逆に、m<1の場合は、レイリー分布よりも激しいフェージング状態と理解することができる。車車間通信のフェージング特性を伸上-m分布でモデル化し、代表的なサービス提供環境のmファクタを求めることで、精度高く平均SNRを予測できる可能性がある。東京都内の実在の市街地交差点を対象とした、シミュレーションとフィールド実験により、フェージング特性を伸上-m分布でモデル化することの有効性に関して検証を行った。

3.2 シミュレーションによる再現性の検証

シミュレーションには、電波を光線として近似し、その軌跡上の反射・回折・透過・減衰・干渉などの影響を幾何光学原理により計算するレイトレース法電波伝搬シミュレータ“Wireless Insight”(REMCOM/構造計画研究所)を使用し、車車間通信による電波伝搬特性を解析した。

(1) シミュレーション条件

対象交差点の道路・建物寸法、間隔、高さなどからFig. 2に示す実スケールの3次元形状モデルをシミュレータ上に作成した。道路、建物の材質は全てコンクリートとした。送信車両(TX)、受信車両(RX)それぞれをTable 3に示す3通りの位置(TX1~TX3, RX1~RX3)に設定し、9通りの送受信車両位置関係ごとに電波伝搬特性を計算した。

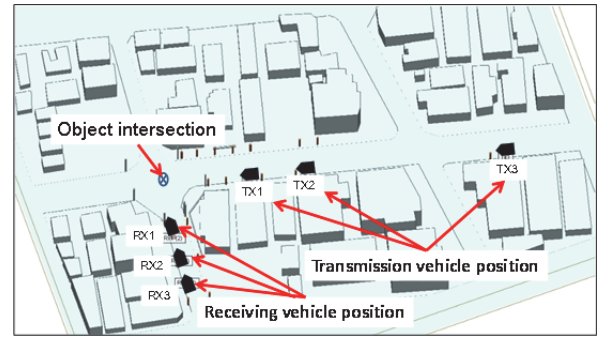


Fig. 2 Raytrace Simulation Model

Table 3 Vehicle Distance from Center of the Intersection

RX Position	Distance (m)	TX Position	Distance (m)
RX1	20.3	TX1	29.2
RX2	28.3	TX2	49.0
RX3	36.3	TX3	115.0

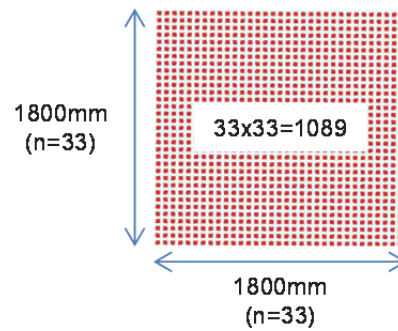


Fig. 3 Receiving Antenna Array Setting

アンテナモデルには、フィールド実験で使用する700MHz帯水平面無指向性モノポールアンテナパラメータを設定した。送信アンテナは、車両を模擬した金属箱モデルの上に設置し、フィールド実験で使用する通信機を中心周波数と同じ720MHzの連続サイン波を放射した。受信車両位置におけるフェージング特性を評価するためには、平均電力が一定とみなせる狭いエリアを設定する必要があるため、交差点角建物による回折波の自由空間減衰量が1dB以内とほぼ一定とみなせる範囲を計算し1800mm×1800mmのエリアを設定した。このエリア内にFig. 3に示すように、33×33=1089個の受信アンテナを等間隔に配置した。ただし、簡単のため受信側には車体モデルは設置していない。受信エリア内の各アンテナで得られた信号強度からアンテナ位置ごとのSNRとエリア内の平均SNRを算出し、受信エリアの受信電力分布特性(pdf)を求めた。

レイトレース計算手法はイメージング法とし、計算条件は、反射、透過、回折回数を、それぞれ3回、1回、1回とした。

(2) シミュレーション結果

シミュレーション結果の一例として、出会い頭発進待機支援サービスでの通信エリア要件の送受信車両位置関係に相当するTX3-RX1内の一つのアンテナ間で抽出された有効伝搬パスの例をFig. 4に示す。交差点周辺の建物壁での反射や、建物角での回折により伝搬パスが抽出されている。アンテナごとに有効伝搬パスの信号強度を合計することで、個々のアンテナ位置での受信電力を求め、1089個全てのアンテナに対して同様の計算をすることで、1800mm²の受信エリアの電力分布のヒストグラムを得る。一例としてFig. 5にRX1エリアにおける受信電力分布を示すヒストグラムと、得られた分布の統計量から求めたpdfを重ねて示す。pdfとしては、レイリー分布 (m=1) と仮定したケースと、仲上-m分布と仮定したケースの2通りを求めた。シミュレーション結果のmファクタは、送受信位置関係ごとに、得られたヒストグラムが仲上-m分布に従うとして最も尤もらしいパラメータを推定する手法である最尤推定法により求めた。



Fig. 4 Simulated Propagation Paths (TX3-RX1)

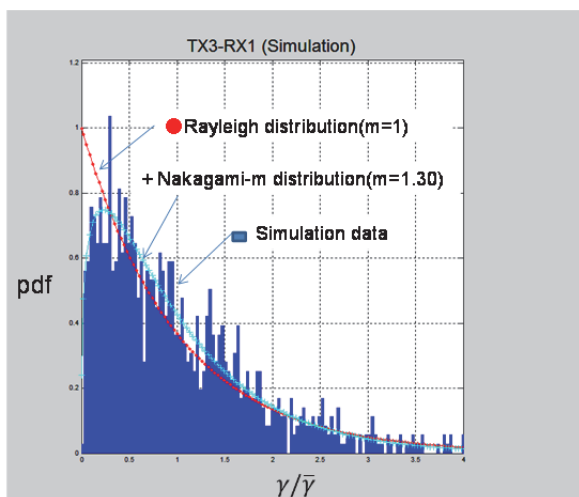


Fig. 5 Fading Characteristics TX3-RX1 (Simulation)

次に、pdfとして仲上-m分布が実際の分布をどの程度再現できているかを定量的に評価するために、カルバックライブラ情報量DKL (Kullback Leibler divergence) (7)を求めた。DKL は、二つの確率分布の相対的な類似度の指標として式(3)で求められ、この値が0であれば等しい分布であり、0に近いほど二つの確率分布の類似

度は高いと解釈できる量とされている。

$$D_{KL}(P||Q) = \sum_{k=0}^{\infty} p(x_k) \log \frac{p(x_k)}{q(x_k)} \quad (3)$$

送受信車両位置関係ごとに求めた受信エリアの分布特性を、レイリー分布 (m=1) と仮定した場合と、それぞれの結果から最尤推定で求めたmファクタによる仲上-m分布と仮定した場合で、シミュレーション結果のヒストグラムに対するDKL を求めた結果をTable 4に示す。

Table 4 D_{KL} (Simulation)

Position	Rayleigh	Nakagami-m
TX3-RX1	0.10	0.08 (m=1.30)
TX2-RX1	0.11	0.09 (m=1.37)
TX1-RX1	0.13	0.08 (m=1.57)
TX3-RX2	0.09	0.09 (m=1.04)
TX2-RX2	0.11	0.11 (m=1.04)
TX1-RX2	0.11	0.10 (m=1.31)
TX3-RX3	0.10	0.10 (m=1.20)
TX2-RX3	0.11	0.10 (m=0.85)
TX1-RX3	0.15	0.10 (m=1.54)

シミュレーション結果からは、送受信位置関係によりmファクタがばらつき、おおむねm>1の卓越成分があるような分布となっているが、送受信位置関係によっては、レイリー分布 (m=1) に近づいたり、TX3-RX2のようにレイリーよりも乱れた分布 (m<1) になることもあることが分かった。DKL でみると、仲上-m分布とした場合に、mファクタが1から外れるケースほど類似度は高い傾向があることから、今回のような交差点環境においては仲上-m分布で表現するほうが実際の分布に近いと考えられる。

3.3 フィールド実験による再現性の検証

シミュレーション検証を行った交差点にて、実車に700MHz帯車間通信機とアンテナを搭載し、シミュレーション時と同じ送受信車両位置関係で各受信車両位置における受信信号強度 (RSSI) を計測・解析し、フェージング特性を評価した。実フィールドでは、送受信車両の位置関係以外の条件、特に周辺の交通状況などはコントロールできないため、周辺の駐停車車両、走行車両、歩行者などの外乱が分布特性に与える影響も解析できるように、計測中の送受信車両間の交通状況もビデオ映像として記録した。

(1) フィールド実験条件

送受信車両に搭載した通信機的主要仕様をTable 5に示す。送信車両のルーフ上中央部 (設置高1685mm) に水平面無指向性モノポールアンテナを設置した。送信機からは100バイト長のデータを10ms間隔で連続送信した。

受信車両も同一車種とし、ルーフ上にFig. 6に示す1~8の位置にアンテナを2本ずつ設置し、進行方向に時速3km/h程度の微低速で2m程一定速で移動しながら計測を繰り返すことで、各受信位置エリアの受信信号強度分布データを取得した。

Table 5 V2V Communication Unit Spec

Frequency	720MHz
Transmit Power	20dBm
Bandwidth	8.3MHz
Modulation Scheme	16QAM (1/2) OFDM
Error-Collection Scheme	Convolutional Code R=1/2
Access Method	CSMA/CA

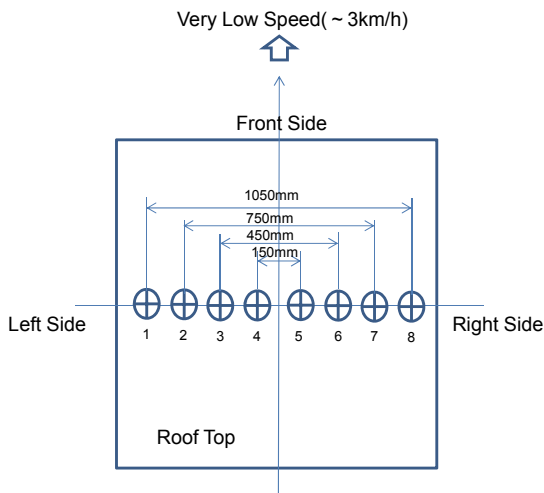


Fig. 6 Receiving Antenna Position (Field Test)

(2) フィールド実験結果

フィールド実験結果に対してもシミュレーション結果と同様の手法で解析・検証を行った。Fig. 7に実測結果から得られた受信電力のヒストグラムと得られた分布の統計量から求めたレイリー分布、仲上-m分布の2種類のpdfを重ねて示す。

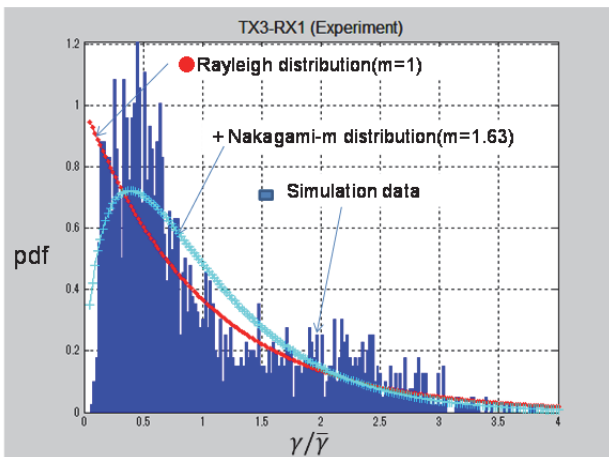


Fig. 7 Fading Characteristic TX3-RX1 (Experiment)

シミュレーション検証と同様レイリー分布、仲上-m分布とフィールド実験結果の分布との類似度の指標となるDKLを全送受信位置関係ごとに求めた結果をTable 6に示す。

Table 6 D_{KL} (Experiment)

Position	Rayleigh	Nakagami-m
TX3-RX1	0.12	0.11 (m=1.63)
TX2-RX1	0.13	0.13 (m=1.25)
TX1-RX1	0.12	0.06 (m=1.86)
TX3-RX2	0.15	0.09 (m=2.05)
TX2-RX2	0.11	0.07 (m=1.78)
TX1-Rx2	0.13	0.09 (m=1.86)
TX3-RX3	0.28	0.06 (m=4.05)
TX2-RX3	0.17	0.07 (m=2.10)
TX1-RX3	0.15	0.09 (m=1.75)

フィールド計測結果の分布特性は、仲上-m分布で表現した場合は、送受信車両位置関係全体にわたり $m > 1$ となった。また、位置関係により m ファクタに大きなばらつきが見られた。更に、シミュレーションで見られたような $m < 1$ になるようなケースはなかった。全体として、 m ファクタが大きく1を超える分布であることから、DKLで見ても仲上-m分布のほうが実測結果の分布をよく表現できているという結果となった。ただし、実測データにはシミュレーションと異なり、周辺走行車両による外乱や受信エリア内のアンテナ位置のばらつき、また、微低速ではあるが移動しながら計測したことによるエリア内のサンプリング位置のばらつきなどが、 m ファクタに影響する可能性があり、本フィールド実験結果の m ファクタについては、計測生データの事前処理方法も含め、引き続き検証していく必要がある。

3.4 フェージング特性モデルの有効性検証

上記のシミュレーション及びフィールド実験結果による再現性検証結果から、伝搬環境のフェージング特性を仲上-m分布でモデル化することで、送受信位置関係の影響も含め実際のフェージング特性を精度よく再現できる見通しが得られた。次に、フェージング特性モデルの性能予測への有効性を検証するために、シミュレーション結果フィールド実験結果それぞれに対してフェージング特性モデルを適用して求めたpdfと伝送方式から求まる $PER(\gamma)$ 特性を、式(1)に適用することで得られる平均SNR-平均PERの関係と、シミュレーション、フィールド実験結果の各受信点のSNRから直接求めたpdfと伝送方式から求まる $PER(\gamma)$ 特性を式(1)に適用して得た平均SNR-平均PERの関係を比較することで、フェージング特性モデルによるSNR予測精度を評価した。

(1) 伝送方式によるPER(γ)特性

伝送方式から決まるPER(γ)特性については、ランダムなビット列からなるパケットを生成し、通信機の伝送方式による誤り訂正符号化処理、変調処理の後、加法的白色ガウス雑音(AWGN)を付加し、復調、復号するまでの一連の伝送処理を、検証すべきSNRの範囲で繰り返しシミュレーション計算を行うことで、各SNRに対するPER(γ)特性を求めた。

(2) SNR 予測精度

以上の方法により、位置関係ごとの平均SNR-平均PERの関係を求めた。TX3-RX1の位置関係におけるシミュレーション結果に対する平均SNR-平均PERの関係をFig. 8に、フィールド実験結果に対する平均SNR-平均PERの関係をFig. 9に示す。

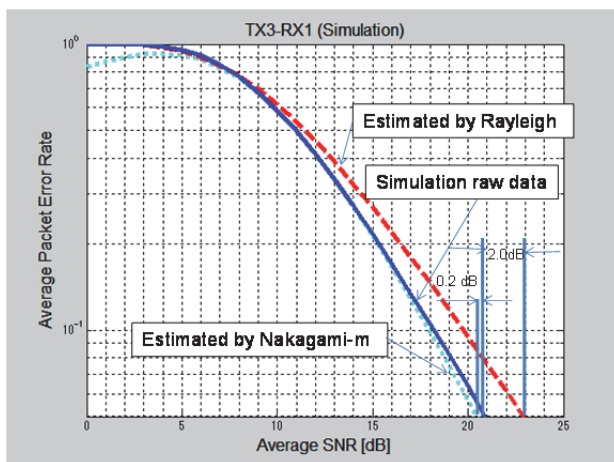


Fig. 8 PER and Average SNR (TX3-RX1 Simulation)

出会い頭発進待機支援サービスの位置関係に相当するTX3-RX1にて、平均PER=5%を達成するために必要な平均SNRを評価した。シミュレーション、フィールド実験生データから直接求めた平均SNRとフェージング特性モデルから予測して求めた平均SNRとの差を比較した。直接求めた平均SNRをSNR_d、レイリー分布で予測した平均SNRをSNR_r、仲上-m分布で予測した平均SNRをSNR_nとした時、各分布での予測値と直接求めた値との差

$\Delta r = \text{SNR}_r - \text{SNR}_d$, $\Delta n = \text{SNR}_n - \text{SNR}_d$ は、シミュレーション結果に対しては、 $\Delta r = 2.0\text{dB}$, $\Delta n = -0.2\text{dB}$ 、フィールド実験結果に対しては、 $\Delta r = 5.0\text{dB}$, $\Delta n = 0.8\text{dB}$ となり、フェージング特性を仲上-m分布としてモデル化することで、所要平均PERの達成に必要な平均SNRを精度よく予測できる目途を得た。

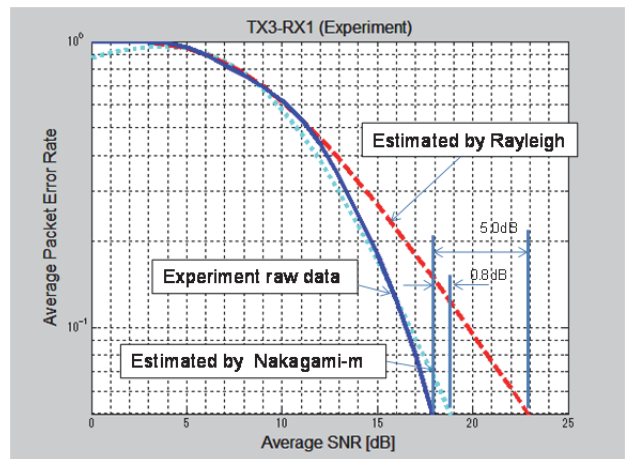


Fig. 9 PER and Average SNR (TX3-RX1 Experiment)

ただし、今回検証した交差点環境のサービス提供条件(TX3-RX1)でのmファクタは、 $m > 1$ であり、レイリー分布で予測して設計するほうがシステムマージンをより多く確保できる。しかし、3.2章で示したように、シミュレーション結果からは、送受信車両位置関係、車両周辺の建物配置によっては、 $m < 1$ になる可能性があることが予想されている。 $m < 1$ となる環境では、レイリー分布として予測して設計すると、システムマージンがマイナスとなり通信システムとして成立しない。従って、車車間通信のように、伝搬特性の変化が激しい環境に対しても精度よく必要な平均SNRを予測できる仲上-m分布が有効であると考えられる。

4. まとめ

実環境にて達成すべきPERに必要な平均SNRを予測し、システムマージンを確保するためのシステムパラメータ設計のためには、フェージング特性を仲上-m分布としてモデル化することが有効であることを示した。また、走行環境条件によっては、フェージング特性は大きく変化すること、場合によっては、レイリー分布よりも厳しいフェージング状態($m < 1$)になる可能性があることもシミュレーションにより示した。引き続きmファクタの変動要因の解明と定式化に向けて取り組んでいきたい。

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) 総務省情報通信審議会情報通信技術分科会ITS無線システム委員会作業班:移動通信システム委員会報告参考資料, p.4 (2011), http://www.soumu.go.jp/main_content/000117297.pdf
- (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年電子情報通信学会総合大会 通信講

演論文集1, p.61 (2008)

- (4) 細谷 : 電波伝搬ハンドブック, リアライズ社,
p.201(1999)
- (5) L. Cheng : “Mobile Vehicle-to-Vehicle Narrowband
Channel Measurement and Characterization of the
5.9 GHz Dedicated Short Range Communication
(DSRC) Frequency Band, IEEE JSAC, vol. 25, No.
8, pp.1501–1516 (2007)
- (6) M.Nakagami : The m-distribution.A general for-
mula of intensity distribution of rapid fading, in
Statistical Methods in Radio propagation,
W.C.Hoffman, Pergamon Press (1960)
- (7) S.Kullback : On Information and sufficiency,
Ann.Math.Statist., vol. 22, pp.79-86 (1953)

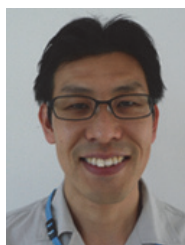
■著者■



山田 秀行



強矢 昌宏



奥木 友和



山本 雅史



荒木 純道



タン ザカン