

文章编号:1007-5321(2021)01-0045-07

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-102

# 基于 3GPP TR38.901 信道模型的时变信道建模与仿真

邢冰倩, 韦再雪

(北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876)

**摘要:** 在实际通信环境中,用户端及周围的障碍物往往处在移动状态下,因此通信环境常建模为时变信道. 为了充分研究当下第 5 代移动通信系统中用户移动性对信道特性的影响,对基于 3GPP TR38.901 信道模型的非平稳时变信道模型和平稳时变信道模型进行了仿真分析. 仿真结果包含了 2 种模型的功率延时谱、信道冲激响应、信道时频相关传递函数、时延扩展、角度扩展和时间自相关曲线等. 充分研究和仿真了 TR38.901 提出的 2 种时变模型,并进行了详尽地对比分析.

**关 键 词:** 3GPP TR38.901 信道模型; 时变信道建模; 用户移动性

**中图分类号:** TN929.5

**文献标志码:** A

## Time-Varying Channel Modeling and Simulation Based on 3GPP TR38.901 Channel Model

XING Bing-qian, WEI Zai-xue

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** In the actual communication environment, the user terminal and surrounding obstacles are often in a mobile state, so the communication environment is often modeled as a time-varying channel. In order to fully study the impact of user mobility on channel characteristics in the current the fifth generation of mobile communications system, a simulation is performed on the non-stationary time-varying channel model and the stationary time-varying channel model based on the 3GPP TR38.901 channel model. The simulations include the power delay spectrum, channel impulse response, channel time-frequency correlation transfer function, delay spread, angle spread and time autocorrelation curves of the two models. Two time-varying models proposed by TR 38.901 are fully studied and simulated, and a detailed comparative analysis is made.

**Key words:** 3GPP TR38.901 channel model; time-varying channel modeling; user mobility

第 5 代移动通信系统(5G, the fifth generation of mobile communications system)是最新一代蜂窝移动通信技术,它的发展是由用户数据吞吐量需求的急速增长所带来的更高容量的需求驱动的<sup>[1]</sup>. 为了准确评估 5G 的性能,其信道特性的研究变得尤为重

要. 在一个实际通信系统中,用户的移动性对信道造成的影响不可忽略. 信道的时间特性可以体现用户移动性对系统造成的影响,因此时变信道的研究变得十分有价值.

当下有许多信道模型可以用于研究用户移动

收稿日期: 2020-07-29

作者简介: 邢冰倩(1997—),女,硕士生.

通信作者: 韦再雪(1976—),女,讲师, E-mail: zaixuew@bupt.edu.cn.

性对信道的影响, cost 2100 模型遵循簇级别的方法,簇(例如:散射对象)被放置在模拟环境中,使用能见度区域的概念与一个或多个移动终端交互<sup>[2]</sup>;用于回程、访问的模型 MiWEBA (mmwave evolution for backhaul and access),其毫米波演变采用准确定信道模型,通过考虑几个强确定性路径和几个相对弱的随机射线的叠加来描述 60 GHz 户外多径信道<sup>[3]</sup>. 然而,多数信道模型在频率范围、用户移动性研究和天线部署等方面各有优缺点,因此需要一个各方面考虑相对完善的信道模型以供参考.

第 3 代合作项目 (3GPP, the third generation partnership project) 为 5G 定义了一种新的 3 维无线电信道模型规范<sup>[4]</sup>,该模型支持 0.5 ~ 100 GHz 之间的载波频率,系统带宽高达 2 GHz,并充分研究了信道的随机特性<sup>[1]</sup>. Ademaj 等<sup>[5]</sup>利用射线追踪技术以 TR38. 901 信道模型为基础研究了空间一致性的问题,给出了城市微蜂窝和农村宏蜂窝场景下的视距 (LOS, line of sight) 与非视距 (NLOS, non-line of sight) 传播的角度自相关曲线;Jaekel 等<sup>[6]</sup>基于 TR38. 901 提出了一种新的计算正弦系数的方法来控制自相关函数形状的方法;Sheikh 等<sup>[7]</sup>比较了 3GPP street canyon 模型和基于射线追踪模型的发射与反射射线方法下 LOS 径、NLOS 径对路径损耗值的影响,并提出了一种新的基于信噪比结果的路径损耗模型. 然而,针对其时变信道模型未有相关仿真结果及分析供学者研究.

基于 3GPP TR38. 901 信道模型,研究了体现用户移动性的 2 种时变模型 A 和 B. 基于信号传播方向对多径快速衰落特性进行建模,发射天线和接收天线之间的链路由多个散射簇组成,每个簇具有不同的抽头延时、传播方向和功率值. 每个簇由具有相同抽头延时和均匀分布功率值的多条散射径组成,对于散射径的到达角和离开角与簇定义的角度会有一个偏差. 基于结构,分别对时变模型 A 和时变模型 B 进行了仿真,给出仿真结果并分析了各自的信道特性. 仿真结果包括各自的信道时延功率谱 (PDP, power delay profile)、信道冲激响应 (CIR, channel impulse response)、信道时频相关传递函数、时延扩展、角度扩展、信道时间自相关等,同时对比分析了这 2 种时变模型的不同特点.

## 1 坐标系、天线模式

### 1.1 坐标系

收发天线模块采用局部坐标系 (LCS, local coordinate system), 时变模型采用全局坐标系 (GCS, global coordinate system)<sup>[4]</sup>.

为了建立 GCS 与 LCS 之间的坐标转换关系,有必要确定描述 GCS 中的点  $(x, y, z)$  转换到 LCS 中的点  $(x', y', z')$  之间的复合旋转矩阵,该旋转矩阵为 3 个旋转矩阵的乘积:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\alpha) \mathbf{R}_y(\beta) \mathbf{R}_x(\gamma) = \begin{pmatrix} +\cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ +\sin \alpha & +\cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} +\cos \beta & 0 & +\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & +\cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & +\cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & +\sin \gamma & +\cos \gamma \end{pmatrix} \quad (1)$$

两坐标系之间的转换由旋转角  $\alpha, \beta, \gamma$  描述,其中:  $\alpha$  为绕  $z$  轴旋转角度,  $\beta$  为绕  $y$  轴旋转角度,  $\gamma$  为绕  $x$  轴旋转角度<sup>[4]</sup>.

### 1.2 天线模式

收发端天线采用单天线面板方式建模. 在天线面板上,天线单元在垂直和水平方向放置,其中  $N$  为列数,  $M$  为每列中具有相同极化方式的天线单元数. 天线单元在水平方向和垂直方向均为均匀分布,水平间距为  $d_h$ ,垂直间距为  $d_v$ . 天线面板极化方式为单极化 ( $P=1$ ) 或双极化 ( $P=2$ ). 具体的收、发端天线阵列配置如下所述,发端天线配置:  $M_t = 2, N_t = 2, P_t = 2$ ; 收端天线配置:  $M_r = 1, N_r = 1, P_r = 2$ . 此外,设定发端天线面板放置于 GCS 坐标系的  $xOz$  平面上,收端天线面板平行于发端面板放置.

单根天线辐射功率图由水平分量和垂直分量组成,依据文献[4]中的表 7.3-1 生成.

## 2 3GPP TR38. 901 信道模型

### 2.1 模型参数

在发端与收端之间,2 维间距与 3 维间距之间的关系由文献[4]中图 7.4.1-1 定义:  $d_{3D} = \sqrt{d_{2D}^2 + (h_t - h_r)^2}$ , 其中  $h_t$  和  $h_r$  分别为发端和收端的高度.

此外,其余模型参数与文献[4]的表 7.5-1 保

持一致。

## 2.2 快速衰落信道模型建模流程

时变信道模型的建模流程如图 1 所示,包括信道场景的选择、天线的配置、信道传播条件的选择、大尺度参数和小尺度参数的生成以及其他信道系数的生成等过程。

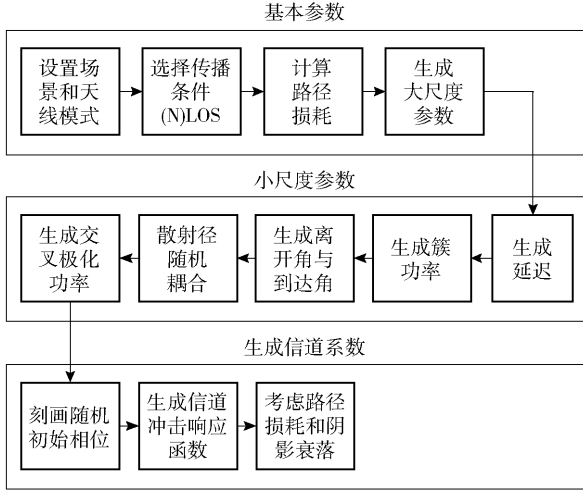


图 1 时变信道建模流程

## 3 基于 3GPP TR38. 901 信道模型的时变信道建模

### 3.1 时变信道模型 A

在  $t_0$  时刻,根据文献[4]中 7.5 节快速衰落模型步骤的 5 ~ 7 生成时延、功率和角度随机初始时刻值。

在  $t_k = t_{k-1} + \Delta t$  时刻,根据收端和发端信道时延、簇功率、角度、收端移动速度及移动方向、 $t_{k-1}$  时刻收端的位置更新信道参数:

簇时延更新为

$$\tilde{\tau}_n(t_k) =$$

$$\begin{cases} \tilde{\tau}_n(t_{k-1}) - \frac{\hat{\mathbf{r}}_{r,n}(t_{k-1})^T \mathbf{v}_r(t_{k-1}) + \hat{\mathbf{r}}_{t,n}(t_{k-1})^T \mathbf{v}_t(t_{k-1})}{c} \Delta t, & k > 0 \\ \tau_n(t_0) + \tau_\Delta(t_0) + \frac{d_{3D}(t_0)}{c}, & k = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $c$  为光速(单位:  $\text{m/s}$ );  $n$  为第  $n$  个散射簇;  $\mathbf{v}_t(t_k)$  和  $\mathbf{v}_r(t_k)$  分别为发端和收端的速度矢量,并且满足  $\|\mathbf{v}_t(t_k)\|_2 = v_t$ ,  $\|\mathbf{v}_r(t_k)\|_2 = v_r$ ;  $d_{3D}(t_0)$  为初始时刻收端天线与发端天线之间的 3 维间距(单位:  $\text{m}$ );  $\tau_n(t_0)$  为初始时刻的簇时延  $\tau_n$ ;  $\tau_\Delta(t_0) = \begin{cases} 0, & \text{LOS} \\ \min(\{\tau'_n\}_{n=1}^N), & \text{NLOS} \end{cases}$ ,  $\tau'_n$  为文献[4]7.5 节中快

速衰落模型的步骤 5 中的  $\tau'_n$ ,  $N$  为散射径的数量。另外,

$$\hat{\mathbf{r}}_{r,n}(t_{k-1}) = \begin{bmatrix} \sin[\theta_{n,\text{ZOA}}(t_{k-1})] \cos[\varphi_{n,\text{AOA}}(t_{k-1})] \\ \sin[\theta_{n,\text{ZOA}}(t_{k-1})] \sin[\varphi_{n,\text{AOA}}(t_{k-1})] \\ \cos[\theta_{n,\text{ZOA}}(t_{k-1})] \end{bmatrix} \quad (3a)$$

其中  $\theta_{n,\text{ZOA}}$  和  $\varphi_{n,\text{AOA}}$  为收端第  $n$  个到达簇的天顶角和方位角。收端到达方位角(AOA, azimuth angle of arrival)指到达簇方向与  $x$  轴的夹角,收端到达天顶角(ZOA, zenith angle of arrival)指到达簇方向与  $z$  轴的夹角。

$$\hat{\mathbf{r}}_{t,n}(t_{k-1}) = \begin{bmatrix} \sin[\theta_{n,\text{ZOD}}(t_{k-1})] \cos[\varphi_{n,\text{AOD}}(t_{k-1})] \\ \sin[\theta_{n,\text{ZOD}}(t_{k-1})] \sin[\varphi_{n,\text{AOD}}(t_{k-1})] \\ \cos[\theta_{n,\text{ZOD}}(t_{k-1})] \end{bmatrix} \quad (3b)$$

其中  $\theta_{n,\text{ZOD}}$  和  $\varphi_{n,\text{AOD}}$  为发端第  $n$  个离开簇的天顶角和方位角。发端离开方位角(AOD, azimuth angle of departure)指发送簇方向与  $x$  轴的夹角,发端离开天顶角(ZOD, zenith angle of departure)指发送簇方向与  $z$  轴的夹角。

在对时延进行更新后,需对其进行标准化:

$$\tau_n(t_k) = \tilde{\tau}_n(t_k) - \min\{\tilde{\tau}_n(t_k)\}_{n=1}^N \quad (4)$$

其中  $t_k$  在模型的整个持续时间之内。

然后,利用更新后的簇时延更新簇功率,  $\theta_{n,\text{ZOA}}$ ,  $\varphi_{n,\text{AOA}}$ ,  $\theta_{n,\text{ZOD}}$  和  $\varphi_{n,\text{AOD}}$ 。根据收端和发端速度矢量的簇变换更新为

$$\mathbf{v}'_{n,r}(t_k) = \begin{cases} \mathbf{v}_r(t_k) - \mathbf{v}_t(t_k), & \text{LOS} \\ \mathbf{R}_{n,r} \mathbf{v}_r(t_k) - \mathbf{v}_t(t_k), & \text{NLOS} \end{cases} \quad (5a)$$

$$\mathbf{v}'_{n,t}(t_k) = \begin{cases} \mathbf{v}_t(t_k) - \mathbf{v}_r(t_k), & \text{LOS} \\ \mathbf{R}_{n,t} \mathbf{v}_t(t_k) - \mathbf{v}_r(t_k), & \text{NLOS} \end{cases} \quad (5b)$$

其中

$$\mathbf{R}_{n,r} = \mathbf{R}_z[\varphi_{n,\text{AOD}}(t_k) + \pi] \times \mathbf{R}_y\left[\frac{\pi}{2} - \theta_{n,\text{ZOD}}(t_k)\right] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & X_n & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\mathbf{R}_y\left[\frac{\pi}{2} - \theta_{n,\text{ZOA}}(t_k)\right] \mathbf{R}_z[-\varphi_{n,\text{AOA}}(t_k)] \quad (6a)$$

$$\mathbf{R}_{n,t} = \mathbf{R}_z[-\varphi_{n,\text{AOD}}(t_k)] \times \mathbf{R}_y\left[\frac{\pi}{2} - \theta_{n,\text{ZOD}}(t_k)\right] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & X_n & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\mathbf{R}_y \left[ \frac{\pi}{2} - \theta_{n,\text{ZOA}}(t_k) \right] \mathbf{R}_z [\varphi_{n,\text{AOA}}(t_k) + \pi] \quad (6b)$$

其中:  $\mathbf{R}_y(\beta)$  和  $\mathbf{R}_z(\alpha)$  为式(1)中的旋转矩阵,  $X_n \in [-1, 1]$  是服从均匀分布的随机数, 在收端移动过程中不改变. 出发角和到达角更新为

$$\begin{aligned} \varphi_{n,\text{AOD}}(t_k) &= \varphi_{n,\text{AOD}}(t_{k-1}) + \\ &\frac{\mathbf{v}'_{n,r}(t_{k-1})^T \hat{\boldsymbol{\varphi}}[\theta_{n,\text{ZOD}}(t_{k-1}), \varphi_{n,\text{AOD}}(t_{k-1})]}{c \tilde{\tau}_n(t_{k-1}) \sin[\theta_{n,\text{ZOD}}(t_{k-1})]} \Delta t \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} \theta_{n,\text{ZOD}}(t_k) &= \theta_{n,\text{ZOD}}(t_{k-1}) + \\ &\frac{\mathbf{v}'_{n,r}(t_{k-1})^T \hat{\boldsymbol{\theta}}[\theta_{n,\text{ZOD}}(t_{k-1}), \varphi_{n,\text{AOD}}(t_{k-1})]}{c \tilde{\tau}_n(t_{k-1})} \Delta t \end{aligned} \quad (7b)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{n,\text{AOA}}(t_k) &= \varphi_{n,\text{AOA}}(t_{k-1}) + \\ &\frac{\mathbf{v}'_{n,l}(t_{k-1})^T \hat{\boldsymbol{\varphi}}[\theta_{n,\text{ZOA}}(t_{k-1}), \varphi_{n,\text{AOA}}(t_{k-1})]}{c \tilde{\tau}_n(t_{k-1}) \sin[\theta_{n,\text{ZOA}}(t_{k-1})]} \Delta t \end{aligned} \quad (7c)$$

$$\begin{aligned} \theta_{n,\text{ZOA}}(t_k) &= \theta_{n,\text{ZOA}}(t_{k-1}) + \\ &\frac{\mathbf{v}'_{n,l}(t_{k-1})^T \hat{\boldsymbol{\theta}}[\theta_{n,\text{ZOA}}(t_{k-1}), \varphi_{n,\text{AOA}}(t_{k-1})]}{c \tilde{\tau}_n(t_{k-1})} \Delta t \end{aligned} \quad (7d)$$

其中  $\hat{\boldsymbol{\varphi}}$  和  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$  为 GCS 坐标系中的球面基向量. 其他信道参数的生成与文献[4]中 7.5 节快速衰落模型的步骤相同.

从上述信道参数的产生过程不难判断, 时变模型 A 是针对非平稳的信道进行建模的. 在一个足够小的时间间隔内, 可以认为信道是平稳的, 可采用一些方法退化到平稳信道模型. 在解析型信道模型中可以清楚地看到这种退化关系<sup>[8]</sup>.

### 3.2 时变信道模型 B

模型 B 需要在每个时刻独立生成信道参数, 各参数在不同时刻独立同分布, 满足平稳条件. 文献[4]7.5 节中快速衰落模型的步骤 5~7 更新为以下步骤:

在  $n \in [1, N]$  内生成簇时延, 每个簇的时延均从均匀分布中随机抽取:

$$\tau'_n \sim \text{unif}(0, 2 \times 10^{\mu_{\text{lg}\tau_{\text{DS}}} + \sigma_{\text{lg}\tau_{\text{DS}}}}) \quad (8)$$

其中:  $\tau_{\text{DS}}$  为时延扩展,  $\mu_{\text{lg}\tau_{\text{DS}}}$  和  $\sigma_{\text{lg}\tau_{\text{DS}}}$  分别为其对数正态分布的均值和标准差. 通过减去最小时延将时延标准化:  $\tau_n = \tau'_n - \min(\tau'_n)$ . 在 LOS 条件下, 将第 1 个簇的时延  $\tau_1$  设为 0.

接下来, 在  $n \in [1, N]$  内, 每个簇收发端的天顶

角和方位角也均从均匀分布中随机抽取:

$$\varphi'_{n,\text{AOA}} \sim 2 \times 10^{\mu_{\text{lg}\varphi_{\text{ASA}}} + \sigma_{\text{lg}\varphi_{\text{ASA}}}} \text{unif}(-1, 1) \quad (9)$$

其中:  $\varphi_{\text{ASA}}$  为 AOA 角扩展 (ASA, azimuth angle spread of arrival),  $\mu_{\text{lg}\varphi_{\text{ASA}}}$  和  $\sigma_{\text{lg}\varphi_{\text{ASA}}}$  分别为其对数正态分布的均值和标准差.  $\varphi'_{n,\text{AOD}}$ ,  $\theta'_{n,\text{ZOA}}$ ,  $\theta'_{n,\text{ZOD}}$  可同样生成. 在 LOS 条件下, 设置第 1 个簇的角度为 0.

生成簇功率为

$$\begin{aligned} P'_n &= \exp\left(\frac{-\tau'_n}{\tau_{\text{DS}}}\right) \exp\left(\frac{-\sqrt{2}|\varphi'_{n,\text{AOA}}|}{\varphi_{\text{ASA}}}\right) \times \\ &\exp\left(\frac{-\sqrt{2}|\varphi'_{n,\text{AOD}}|}{\varphi_{\text{ASD}}}\right) \exp\left(\frac{-\sqrt{2}|\theta'_{n,\text{ZOA}}|}{\theta_{\text{ZSA}}}\right) \times \\ &\exp\left(\frac{-\sqrt{2}|\theta'_{n,\text{ZOD}}|}{\theta_{\text{ZSD}}}\right) 10^{\frac{-Z_n}{10}} \end{aligned} \quad (10)$$

其中:  $Z_n \sim N(0, \xi^2)$  为每个簇的阴影衰落相关项 (单位: dB),  $\varphi_{\text{ASD}}$  为 AOD 角扩展 (ASD, azimuth angle spread of departure),  $\theta_{\text{ZSA}}$  为 ZOA 角扩展 (ZSA, zenith angle spread of arrival),  $\theta_{\text{ZSD}}$  为 ZOD 角扩展 (ZSD, zenith angle spread of departure). 然后, 将簇功率值归一化, 使所有簇功率之和等于 1, 即

$$P_n = \frac{P'_n}{\sum_{n=1}^N P'_n} \quad (11)$$

在 LOS 条件下, 将原  $\tau_{\text{DS}}$ ,  $\varphi_{\text{ASA}}$ ,  $\varphi_{\text{ASD}}$ ,  $\theta_{\text{ZSA}}$ ,  $\theta_{\text{ZSD}}$  扩大  $\sqrt{1+K_R}$  倍,  $K_R$  是线性化的莱斯  $K$  因子. 在 LOS 条件下, 第 1 个簇的功率为

$$P_{1,\text{LOS}} = \frac{K_R}{K_R + 1} \quad (12)$$

因此,

$$P_n = \frac{1}{K_R + 1} \frac{P'_n}{\sum_{n=1}^N P'_n} + \delta(n-1) P_{1,\text{LOS}} \quad (13)$$

其中  $\delta(n)$  为狄拉克函数.

将簇内每条射线的功率分配为  $P_n/M$ , 其中  $M$  为每个簇中射线的数量.

然后, 生成离开簇与到达簇的簇内射线方位角与天顶角. AOA 的簇内射线角定义为

$$\varphi_{n,m,\text{AOA}} = \varphi'_{n,\text{AOA}} + \varphi_{\text{LOS},\text{AOA}} + c_{\text{ASA}} \alpha_m \quad (14)$$

其中:  $\varphi_{n,m,\text{AOA}}$  为第  $n$  个簇内第  $m$  条射线的 AOA,  $\varphi_{\text{LOS},\text{AOA}}$  为 LOS 方位角,  $c_{\text{ASA}}$  为 ASA 的簇偏移因子,  $\alpha_m$  为 ADA 的簇内射线角偏移. AOD ( $\varphi_{n,m,\text{AOD}}$ ) 与 AOA 的上述生成过程类似.

ZOA 的簇内射线角定义为

$$\theta_{n,m,\text{ZOA}} = \varphi'_{n,\text{ZOA}} + \bar{\theta}_{\text{ZOA}} + c_{\text{ZSA}} \alpha_m \quad (15)$$



其中  $\bar{\theta}_{\text{ZOA}} = \theta_{\text{LOS,ZOA}}$  为 LOS 天顶角.

ZOD 的簇内射线角定义为

$$\theta_{n,m,\text{ZOD}} = \varphi'_{n,\text{ZOD}} + \theta_{\text{LOS,ZOD}} + \mu_{\text{offset,ZOD}} + \frac{3}{8} 10^{\mu_{\text{lgZSD}}} \alpha_m \quad (16)$$

其中:  $\mu_{\text{offset,ZOD}}$  为 ZSD 的偏移参数,  $\mu_{\text{lgZSD}}$  为  $\theta_{\text{ZSD}}$  对数正态分布的均值.

此外,多普勒频移通常被定义为信道相位随时间的导数,它可以是发端、收端或散射体运动的结果. 因此,需要注意的是 A、B 2 种时变信道模型在描述信道冲激响应时,需将最后的多普勒频移项替换为

$$\exp \left[ j2\pi \int_{t_0}^t \frac{\hat{\mathbf{r}}_{r,n,m}^T(t_k) \mathbf{v}(t_k)}{\lambda_0} dt_k \right] \quad (17)$$

其中:  $\hat{\mathbf{r}}_{r,n,m}(t_k)$  为  $t_k$  时刻收端的归一化矢量,  $\mathbf{v}(t_k)$  为  $t$  时刻收端的速度矢量,  $t_0$  为初始时刻, 设为 0,  $t_k \in [t_0, t]$ .

## 4 仿真结果分析

### 4.1 模型参数配置

#### 4.1.1 设置传播环境、模型布局、天线阵列参数

1) 选取城市微蜂窝街道 (UMi-Street canyon, urban micro-street canyon) 场景, 在 GCS 中确定收发端天线位置, 定义天顶角  $\theta$ 、方位角  $\varphi$ 、球面基向量  $\hat{\theta}$  与  $\hat{\varphi}$ .

2) 给定发端和收端的数量: 1 个发端设备, 1 个收端设备. 发端高度为 10 m, 收端高度为 20 m. 发端与收端之间的水平间距为 10 m,  $d_{2D}$  和  $d_{3D}$  随时间变化,  $d_{2D} = \sqrt{10^2 + (vt)^2}$ ,  $d_{3D} = \sqrt{d_{2D}^2 + (h_t - h_r)^2}$ , 其中,  $v$  为收端在 GCS 坐标系中的移动速度,  $v = 3 \text{ km/h}$ , 移动方向为沿  $x$  轴正方向 ( $\theta_v = 90^\circ$ ,  $\varphi_v = 0^\circ$ ). 发端有 8 根天线, 天线长度  $l = 0.6 \text{ m}$ , 天线单元间距  $d_v = 0.5\lambda_0$ ,  $d_h = 0.5\lambda_0$  (其中  $\lambda_0 = \frac{c}{f_c}$ ,  $f_c$  为系统中心频率).

3) 给定发端和收端初始位置的 3 维坐标: 发端有 8 根天线, 坐标为:  $(0, 0, 10)$ ,  $(0, 0, 10 + 0.3\sqrt{2})$ ,  $(0, 0, 10 + 0.5\lambda_0)$ ,  $(0, 0, 10 + 0.3\sqrt{2} + 0.5\lambda_0)$ ,  $(0.5\lambda_0, 0, 10)$ ,  $(0.5\lambda_0, 0, 10 + 0.3\sqrt{2})$ ,  $(0.5\lambda_0, 0, 10 + 0.5\lambda_0)$ ,  $(0.5\lambda_0, 0, 10 + 0.3\sqrt{2} + 0.5\lambda_0)$ , 收端有 2 根天线, 坐标为:  $(0 + vt, 10, 20)$ ,  $(0 + vt, 10, 20.3)$ . 给定发端和收端的 LOS 角度:  $\varphi_{\text{LOS,AOA}} =$

$-180^\circ$ ,  $\varphi_{\text{LOS,AOD}} = 0^\circ$ ,  $\theta_{\text{LOS,ZOA}} = 81.5^\circ$ ,  $\theta_{\text{LOS,ZOD}} = 98.5^\circ$ .

4) 设置发端和收端的天线辐射场分量  $F_l$  和  $F_r$ , 具体构造方法参考文献[4]中 7.3 节.

5) 设定发端和收端天线阵列相对于 GCS 的方向: 发端阵列方向被定义为 3 个角  $\Omega_{l,\alpha} = \frac{\pi}{4}$ ,  $\Omega_{l,\beta} = 0$

和  $\Omega_{l,\gamma} = \frac{\pi}{2}$ . 收端阵列方向亦被定义为 3 个角

$\Omega_{r,\alpha} = 0$ ,  $\Omega_{r,\beta} = 0$  和  $\Omega_{r,\gamma} = \frac{\pi}{2}$ .

6) 指定系统中心频率  $f_c = 4 \text{ GHz}$ .

#### 4.1.2 生成大尺度参数

对 LOS、NLOS 分别建模: LOS 簇数  $N_{\text{LOS}} = 12$ , NLOS 簇数  $N_{\text{NLOS}} = 19$ , 簇内多径数均为  $M = 20$ , 不同发端—收端链路的传播条件不相关.

给出  $\tau_{\text{DS}}$ 、 $\varphi_{\text{ASA}}$ 、 $\varphi_{\text{ASD}}$ 、 $\theta_{\text{ZSA}}$ 、 $\theta_{\text{ZSD}}$ 、 $K$  和阴影衰落 (SF, shadow fading). 不同发端—收端链路之间的大尺度参数不相关, 但从同一出发点到达收端的链路相同. 规定随机均方根角扩展上限:  $\varphi_{\text{ASA}} = \min(\varphi_{\text{ASA}}, 104^\circ)$ ,  $\varphi_{\text{ASD}} = \min(\varphi_{\text{ASD}}, 104^\circ)$ ,  $\theta_{\text{ZSA}} = \min(\theta_{\text{ZSA}}, 52^\circ)$ ,  $\theta_{\text{ZSD}} = \min(\theta_{\text{ZSD}}, 52^\circ)$ . 建模过程中其余信道参数选取文献[4]中的表 7.5-2, 7.5-3, 7.5-4, 7.5-6, 7.5-8, 7.7.1-4, 7.7.2-1 UMi-Street canyon 场景相关参数.

以上参数适用于时变信道模型 A 和模型 B.

### 4.2 仿真结果及分析

模型 A 各信道参数与上一时刻密切相关, 而模型 B 每个时刻根据解析关系式独立生成随机信道参数. 因此, 模型 A 的时频相关传递函数曲线会有不规则起伏, 模型 B 则为规则起伏; 模型 A 的时间自相关曲线相比模型 B 波动小; 模型 A 的时延扩展和角度扩展曲线在不同时刻的结果差异会比模型 B 明显. 这样的信道特点印证了模型 A 为非平稳信道, 模型 B 为平稳信道.

因收端与发端之间的间距不断增加, 发端与收端之间的信道也随之不断变化. 初始时刻的功率与时延呈指数关系, 在收端移动过程中不改变. 图 2 所示为模型 A 和模型 B 在发端 1 号天线与收端 1 号天线之间的信道上, NLOS 条件下的 PDP.

由图 2 可知, 2 种模型的 PDP 均呈指数分布, 功率集中在  $0.1 \mu\text{s}$  之内, 符合 5G 信道的标准. 模型 A 紧凑相关, 模型 B 离散稀疏. 时延越小, 信号传播越

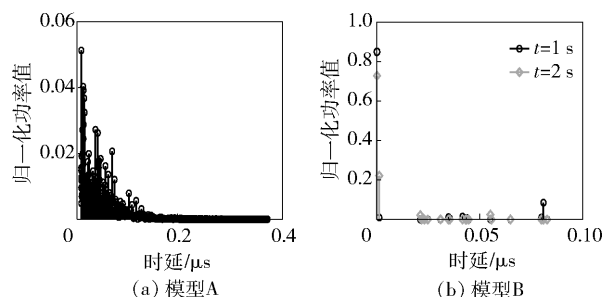


图2 模型A和模型B的PDP

有效,接收功率越大。

CIR 的表示采用抽头延时线模型,由功率项、极化天线项、初始随机相位矩阵项、收发端位置项和多普勒频移项组成,然后再叠加与信道时延相关的脉冲项。图3所示为模型A和模型B在发端1号天线与收端1号天线之间的信道上,LOS/NLOS条件下的CIR曲线,由图可知,模型A的时延轴连续,模型B的时延以簇为单位生成,每时刻每个簇独立生成时延,因此其时延轴不连续。

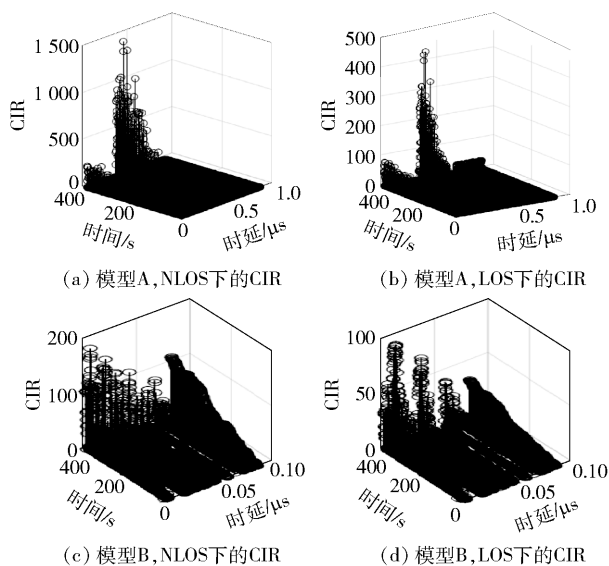


图3 模型A和模型B的CIR

对 CIR 进行傅里叶变换得到信道的时频相关传递函数矩阵  $\mathbf{H}$ ,如图4所示。同样取发端1号天线与收端1号天线之间的信道为参考。模型A每时刻的参数依赖上一时刻生成,即具有时变性,信道起伏明显。模型B每时刻的参数按照相同的规则随机生成,其波动规律一致,趋于平稳。因此,可知模型A为非平稳信道,模型B为平稳的信道,为后续工作提供了较全面的信道类型基础。

移动信道的多径环境引起的信号多径衰落从空

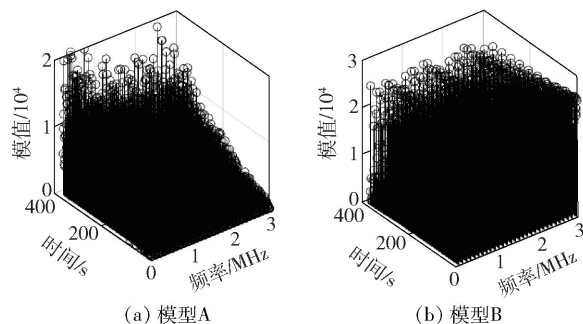


图4 模型A和模型B的时频相关传递函数曲线

域角度方面考虑,体现为信号在接收天线上的到达角度会展宽。图5(a)和(b)所示为2种模型在  $t=1\text{ s}$ 、 $2\text{ s}$ 、 $3\text{ s}$  时, AOA 角度扩展累积分布函数(CDF, cumulative distribution function)曲线。由图可知,模型A的3条曲线有明显区分,呈现非平稳特性。模型B在每个时刻信道参数以同样的方式生成,图中不同时刻3条曲线很接近,它呈现信道平稳特性。

均方根时延扩展描述了信道的时间色散,图5(c)所示为模型A在  $t=10\text{ s}$ 、 $20\text{ s}$  时 NLOS 均方根时延扩展 CDF 曲线,图5(d)所示为模型B在  $t=1\text{ s}$ 、 $2\text{ s}$ 、 $3\text{ s}$  时 NLOS 均方根时延扩展 CDF 曲线。信号在接近初始时刻时,时延扩展小。随着信号在信道环境中传播时间越长,损耗越大,时延扩展越大。

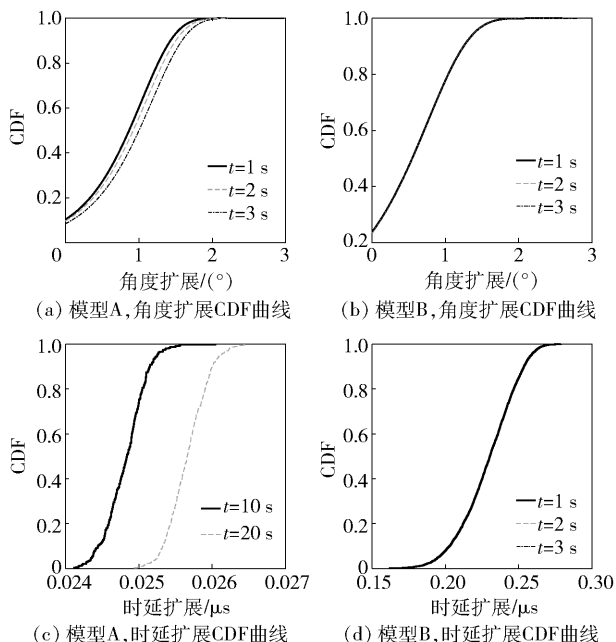


图5 模型A和模型B的 AOA 角度扩展与均方根时延扩展的 CDF 曲线

时间自相关可以表达某个信道不同时刻的相互依赖关系,以此判断信道的特征。图6所示为发端1

号天线与收端 1 号天线之间的信道,  $t = 1\text{ s}$  和  $t = 2\text{ s}$  时, 以初始时刻为参考的模型 A 与模型 B 的归一化自相关曲线. 越接近初始时刻  $t_0$ , 信道时间相关性越大; 随着时间增加, 信道相关性变小, 起伏变多. 由于模型 B 每个时刻随机生成的信道参数, 导致不同时刻信道的相关性降低, 其曲线波动剧烈.

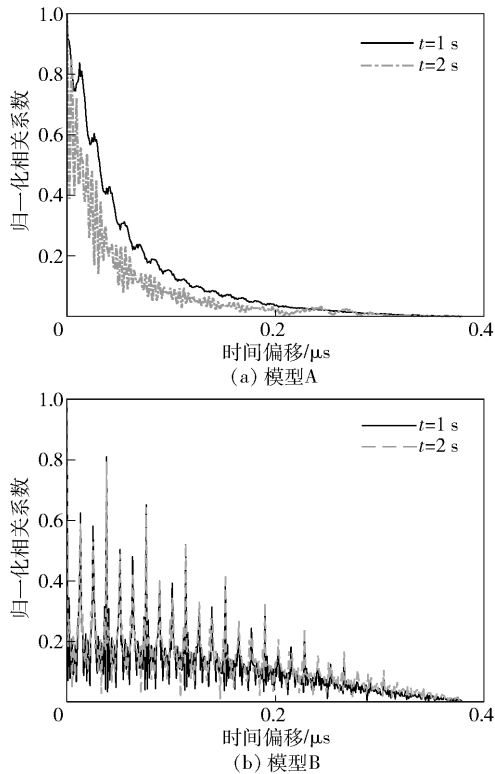


图 6 模型 A 和模型 B 的归一化自相关系数

## 5 结束语

在 5G 通信系统中, 有关时变信道模型的研究对认识实际通信系统信道的特点非常重要. 以 3GPP TR38. 901 信道模型为基础, 研究了 2 种时变信道模型的信道特征并给出了仿真结果以及分析. 根据 2 种时变信道模型的 PDP、CIR、信道时频相关传递函数曲线、时延扩展曲线、角度扩展曲线、时间自相关曲线等仿真结果对比分析并认识了各自的特点与不同. 模型 A 适用于非平稳信道, 模型 B 适用

于平稳信道, 给以后的研究建立了较为全面的模型基础. 最后, 理论与实际结合也是至关重要的, 计划在下一步工作中完成与实测信道数据的对比, 使模型更加贴合实际情况.

## 参考文献:

- [1] Karabulut Umur, Awada Ahmad, Viering Ingo, et al. Spatial and temporal channel characteristics of 5G 3D channel model with beamforming for user mobility investigations[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(12): 38-45.
- [2] Liu Lingfeng, Oestges Claude, Poutanen Juho, et al. The COST 2100 MIMO channel model[J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(6): 92-99.
- [3] Samimi Mathew K, Rappaport Theodore S. 3-D millimeter-wave statistical channel model for 5G wireless system design[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(7): 2207-2225.
- [4] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 15): TR 38. 901 V15. 1.0—2019 [S/OL]. Valbonne: 3GPP Support Office, 2019: 1-102 [2020-07-29]. <https://www.3gpp.org/DynaReport/38-series.htm>.
- [5] Ademaj Fjolla, Schwarz Stefan, Berisha Taulant, et al. A spatial consistency model for geometry-based stochastic channels[J]. IEEE Access, 2019, 7: 183414 - 183427.
- [6] Jaeckel Stephan, Raschkowski Leszek, Burkhardt Frank, et al. Efficient sum-of-sinusoids-based spatial consistency for the 3GPP new-radio channel model [C] // GC Wk-shps. Abu Dhabi: IEEE, 2019: 1-7.
- [7] Sheikh Muhammad Usman, Jantti Riku, Hamalainen Jyri. Impact of interference suppression under ray tracing and 3GPP street canyon model [C] // VTC Spring 2020. Antwerp: IEEE, 2020: 1-6.
- [8] Wei Zaixue, Tang Qipeng, Geng Jian, et al. Analytical non-stationary satellite to aircraft channel modeling over open area based on regular shaped geometry-based stochastic model [J/OL]. MDPI Applied Sciences-Basel, 2020, 10(15) [2020-07-29]. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/15/5041>. DOI:10.3390/app10155041.