

DOI: 10.13382/j.jemi.B1901960

瑞利衰落信道模型的综合验证方法*

黄继斌 何怡刚 隋永波 黄 源 吴裕庭
(合肥工业大学 电气与自动化学院 合肥 230009)

摘 要:现有的信道模型验证方法大多只能验证衰落模型的一阶统计特性,即信号包络的幅值特性和相位特性。由于衰落信道模型的复杂性和多样性,已有的一阶统计特性验证方法不能对信道模型进行精确分类,提出一种瑞利衰落模型的综合验证方法。首先通过一阶统计特性验证是否服从瑞利分布,然后由多普勒功率谱分布验证属于何种瑞利衰落模型,提取衰落信道复序列的多普勒功率谱密度函数,计算与理论多普勒功率谱密度的对数均方能量误差(LMSEE),利用 LMSEE 判定多普勒功率谱分布类型,从而完成对给定衰落信道模型的验证。进行了大量仿真实验和实物验证,将输入信号通过各衰落信道模型后得到输出信号,分析输出信号的统计分布,验证对常见瑞利衰落模型的识别性能,实验结果显示识别正确率超过 98%,表明了方法的有效性。

关键词: 瑞利衰落信道;统计特性;拟合优度检验;多普勒功率谱密度;对数均方能量误差(LMSEE)

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Comprehensive verification method for rayleigh fading channel model

Huang Jibin He Yigang Sui Yongbo Huang Yuan Wu Yuting
(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Most of the existing channel model verification methods can only verify the first-order statistical characteristics of the fading model, i. e. the amplitude and phase characteristics of the signal envelope. Due to the complexity and diversity of the fading channel model, the existing first-order statistical characteristic verification methods cannot accurately classify the channel model. A comprehensive verification method of Rayleigh fading model is proposed. Firstly, the Rayleigh distribution is verified by the first-order statistical characteristics. Then the Rayleigh fading model is verified by the Doppler power spectrum distribution. The Doppler power spectrum density function of the complex sequence of the fading channel is extracted. The logarithm mean square error (LMSEE) with the theoretical Doppler power spectrum density is calculated, and the type of Doppler power spectrum distribution is determined by LMSEE so as to complete the verification of the given fading channel model. A large number of simulation experiments and physical verification are carried out. The input signal is passed through each fading channel model to get the output signal. The statistical distribution of the output signal is analyzed to verify the recognition performance of common Rayleigh fading models. The experimental results show that the recognition accuracy is more than 98%, which shows the effectiveness of this method.

Keywords: Rayleigh fading channel; statistical characteristics; goodness of fit test; Doppler power spectral density; logarithmic mean square energy error (LMSEE)

0 引 言

随着信息科学的不断发展,无线通信技术近年来取

得了长足的进步,同时,无线通信系统也越来越复杂。作为无线通信系统的重要组成部分,无线信道的性能好坏直接影响着系统的通信质量。在实际应用中,由于电磁波在空间中传播环境复杂多变,信号从发送端到达接收

端历经的传输路径、时间各不相同,造成多径衰落特性^[1]。国内外学者对无线信道建模进行了大量研究,先后提出了瑞利衰落模型^[2]、莱斯衰落模型^[3]、Nakagami 模型^[4]、对数正态模型^[5]、常量模型^[6]等。

瑞利衰落模型是一种经典的模型,描述了在无线信号传输过程中,由于建筑物或其他物体遮挡导致电磁波经反射、折射及散射等多条路径到达接收端的最差情形,是研究无线信道模型的基础^[7]。瑞利信道的信号包络服从瑞利分布、相位服从均匀分布,其多普勒功率谱密度为典型的 U 型功率谱。

仿真得到无线信道模型后,为了检验其精确度与稳定性,需要对其进行验证与评估^[8]。近些年来对瑞利衰落信道的研究比较了不同瑞利衰落信道模型的幅值特性、相关特性、误码率^[9],而少有严格的验证与评估,因此需要研究瑞利衰落信道的评估方法。

文献[10]提出一种基于 K-S 拟合优度检验的瑞利衰落信道统计特性评估算法,将经验累积分布函数和理论累积分布函数对比,验证幅值序列和相位序列是否分别服从瑞利分布和均匀分布。然而,这种方法只能评估信道一阶统计特性,忽略了对二阶统计特性的验证。在众多标准衰落信道模型中,经典瑞利衰落信道响应的包络服从瑞利分布,其多普勒功率谱为经典 Jakes 多普勒功率谱;而瑞利-平坦和瑞利-高斯模型的包络服从瑞利分布,但多普勒功率谱各不相同,分别服从平坦和高斯分布。因此,仅对一阶统计特性进行分析的方法不能准确分辨经典瑞利模型、平坦模型及高斯模型,还需要验证衰落信道模型的二阶统计特性。

文献[11]提出一种基于卡方拟合优度检验的莱斯衰落信道统计特性可信性评估方法,引入卡方拟合优度检验莱斯衰落信道模型的统计特性。然而,该方法仅支持验证莱斯衰落模型,不支持多种复杂模型的检验。

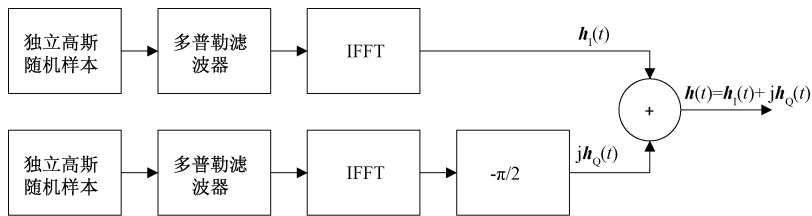


图 1 瑞利衰落信道实现模型

Fig. 1 Rayleigh fading channel implementation model

由此方法产生的经典瑞利信道时域衰落如图 2 所示,最大多普勒频移为 500 Hz,采样频率为 20 kHz,由结果可知时域信道符合时变、快衰落的特点。

衰落信道的包络为:

$$r(t) = |\mathbf{h}(t)| = \sqrt{h_I^2(t) + h_Q^2(t)} \quad (2)$$

瑞利衰落信道的包络服从瑞利分布,是一个均值为

本文提出一种瑞利衰落模型的综合验证方法,不仅能够验证信道一阶统计特性,还进一步对多普勒功率谱密度函数进行分析,验证其二阶统计特性。首先提取给定衰落信道数据的包络幅值序列,验证幅值序列是否符合瑞利分布,若符合则进入下一步,计算多普勒功率谱密度,并求出实际信道和理论信道多普勒功率谱密度的对数均方能量误差,最后将其进行判断,检验给定信道的多普勒功率谱密度是否服从相应的分布。通过大量实验检验该算法的可行性和正确率,仿真与实验结果表明,该算法可以准确地验证衰落信道模型的一阶统计特性和多普勒功率谱特性,进而判定出多种瑞利衰落分布模型。

1 信道模型

瑞利衰落信道的仿真方法有正弦波叠加法和成形滤波器法。其中,正弦波叠加法实现方式简单、运算量小,但是数据精度有限,性能不够理想,与参考模型差异较大;成形滤波器法虽然设计复杂度较高,但相比正弦波叠加法有较大的统计精度提升,能够更好地仿真出衰落信道模型,本文采用多普勒滤波器法产生瑞利衰落信道,其信道实现模型如图 1 所示。首先用信号发生器生成两路相互独立的高斯白噪声信号,分别送入多普勒滤波器中给信号加入指定的多普勒频移,再进行快速傅里叶反变换 (IFFT) 得到瑞利衰落信道的实部和虚部,最后将实部虚部相加得到满足要求的瑞利衰落信道:

$$\mathbf{h}(t) = \mathbf{h}_I(t) + j\mathbf{h}_Q(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N c_n e^{j2\pi f_d t + \theta_n} \quad (1)$$

式中: N 是传播路径的数量; c_n 是多普勒系数; f_d 是最大多普勒频移; θ_n 是多普勒相位,在 $[\pi, \pi)$ 范围内均匀分布。

0, 方差为 σ^2 的平稳窄带高斯过程,概率密度函数为:

$$f(z) = \frac{z}{\sigma^2} e^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}}, z > 0 \quad (3)$$

常见的瑞利衰落信道可以进一步分为经典瑞利、瑞利-平坦、瑞利-高斯、瑞利-巴特沃兹、瑞利-圆拱等模型,它们的信道包络均服从式(3)的概率密度函数,但是多

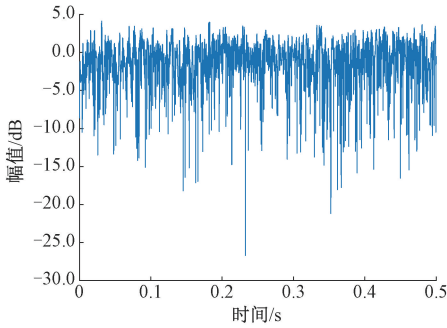


图2 瑞利信道时域衰落图

Fig. 2 Rayleigh channel time-domain fading graph

普勒功率谱分布各不相同,其中,经典瑞利衰落模型的理论多普勒功率谱密度函数如图3所示,是典型的U型谱。

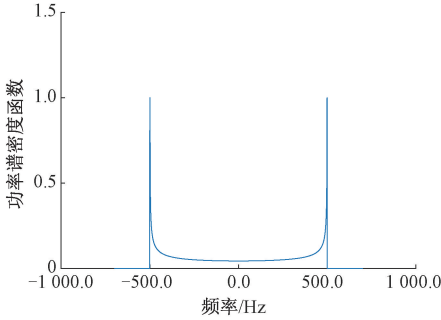


图3 经典瑞利衰落的理论多普勒功率谱密度

Fig. 3 Theoretical Doppler PSD of classical Rayleigh fading

其他几种分布模型的产生原理和经典瑞利衰落信道模型原理相同,不再一一赘述。

2 瑞利衰落模型的综合验证方法

针对现有方法只能验证给定衰落信道模型是否服从瑞利分布,却不能验证其具体服从于何种频谱的缺陷,本文提出一种瑞利衰落模型综合验证方法,可以有效地解决这个问题。本方法包括一阶统计特性检验和功率谱密度分布验证两个步骤。1)利用拐点法验证给定衰落信道模型是否符合瑞利分布;2)根据对数均方能量误差判定功率谱密度符合哪种频谱分布,从而验证衰落信道模型。

2.1 一阶统计特性检验

信道模型的统计特性是描述信道的重要工具,因此分析统计特性是通信系统研究中的重要一环,对几种衰落信道模型的一阶统计特性进行分析,研究对象为信道响应包络的概率密度函数。

1) 一阶统计特性分析

从经典瑞利衰落模型的信道复序列 $\{h_n\}$ ($n=1, \dots, N$)中提取出包络序列 $\{r_n\}$ ($n=1, \dots, N$),其中 N 表示信

道所取数据样本的采样点数,然后绘制包络幅值概率密度直方图如图4所示。

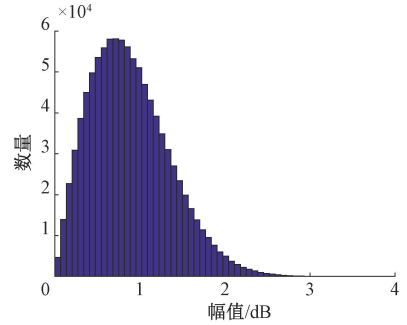


图4 经典瑞利衰落包络幅值概率密度直方图

Fig. 4 Classical Rayleigh fading envelope amplitude probability density histogram

包络概率密度函数为:

$$f(r) = r \int_0^\infty J_0\left(q\sqrt{\frac{2}{N}}\right) J_0(rq) dq, r \geq 0 \quad (4)$$

式中: $J_0(\cdot)$ 为第一类零阶贝塞尔函数。随着 N 的增加,包络概率密度函数会逐渐趋向瑞利分布,即:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} f(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

为了适应信号在各种情况下的传播环境,本文考虑了经典瑞利、瑞利-平坦、瑞利-高斯、瑞利-巴特沃兹及瑞利-圆拱等几种常见瑞利衰落信道模型,这几种衰落分布模型的包络概率密度函数均服从瑞利分布。

2) 一阶统计特性验证方法

为了验证衰落信道模型的一阶统计特性,考虑瑞利分布的理想分布函数 $F(x)$ 和理想概率密度函数 $f(x)$:

$$F(x) = \begin{cases} \int_0^x \frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt, x \geq 0 \\ 0, x < 0 \end{cases} = \begin{cases} 1 - e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, x \geq 0 \\ 0, x < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, x \geq 0 \\ 0, x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: x 表示信道估计数据包络的幅值; σ 为标准差。接下来求 $f(x)$ 的二阶微分:

$$f''(x) = \left(\frac{x^3}{\sigma^6} - \frac{3x}{\sigma^4} \right) e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, x \geq 0 \quad (8)$$

令 $f''(x) = 0$, 得到概率密度函数的拐点:

$$x_0 = \sqrt{3} \sigma \quad (9)$$

因此,拐点 x_0 处对应的理想信道中幅值 $< x_0$ 的统计比例 ρ_0 为:

$$\rho_0 = F(x_0) = \int_0^{\sqrt{3}\sigma} \frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt \quad (10)$$

作为与理想信道统计比例的对比,计算实际待验证信道数据样本中幅值小于 x_0 的数据占全部信道长度的比例 ρ_1 :

$$\rho_1 = \frac{L(x_{ei} - x_0)}{n} \quad (11)$$

其中, $1 \leq i \leq n$, $L(\cdot)$ 为数据的长度,即数据个数; n 为样本容量,即总数据个数。定义差异函数 η 表示 ρ_0 与 ρ_1 的接近程度:

$$\eta = \frac{|\rho_1 - \rho_0|}{\rho_1 + \rho_0} \quad (12)$$

当 η 越小, ρ_0 与 ρ_1 的数值越接近,给定信道与理论模型拟合的就越好。设定阈值 ε ,当 $\eta < \varepsilon$ 时,给定信道包络的幅值服从瑞利分布;否则,信道包络的幅值不服从瑞利分布。

综上,根据概率密度函数拐点判别一阶统计特性的方法框图如图 5 所示。

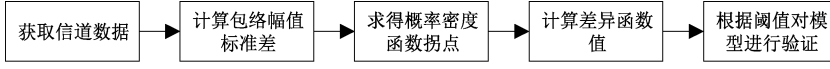


图 5 一阶统计特性验证方法框图

Fig. 5 Block diagram of first-order statistical characteristic verification method

2.2 多普勒功率谱密度分布验证

对一阶统计特性验证完成后,不能完全确定衰落信道模型的类型,需要进一步对信道模型的多普勒功率密度函数进行分析验证。

1) 多普勒功率谱分析

由于接收端的运动和多普勒效应产生多普勒频移,基于不同入射角度,由所有散射(反射)环境叠加而成的连续多普勒频谱称为多普勒功率谱,是用来描述信道在频率上色散的重要指标。随机过程的自相关函数与其功率谱密度为傅里叶变换对,本文先求产生信道的自相关函数,再做傅里叶变换得到实际功率谱密度函数,最后与理论功率谱密度进行对比验证。

理想情况下,经典瑞利衰落模型的多普勒功率谱为经典 Jakes 多普勒功率谱,公式为:

$$S_1(f) = \begin{cases} \frac{\sigma_0^2}{\pi f_m \sqrt{1 - (f/f_m)^2}}, & |f| \leq f_m \\ 0, & |f| > f_m \end{cases} \quad (13)$$

式中: f_m 为最大多普勒频率; σ_0 为各入射角度入射波的平均功率。

式(14)~(17)分别列出了瑞利-平坦、瑞利-高斯、瑞利-巴特沃兹、瑞利-圆拱衰落模型的多普勒功率谱公式。

$$S_2(f) = \begin{cases} \frac{\sigma_0^2}{2f_m}, & |f| \leq f_m \\ 0, & |f| > f_m \end{cases} \quad (14)$$

$$S_3(f) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-\left(\frac{f}{f_m}\right)^2}, & |f| \leq f_m \\ 0, & |f| > f_m \end{cases} \quad (15)$$

$$S_4(f) = \begin{cases} \frac{\sigma_0^2}{1 + \left(\frac{f}{f_m}\right)^2}, & |f| \leq f_m \\ 0, & |f| > f_m \end{cases} \quad (16)$$

$$S_5(f) = \begin{cases} \sigma_0^2 \times \left(1 - 1.72\left(\frac{f}{f_m}\right)^2 + 0.785\left(\frac{f}{f_m}\right)^4\right), & |f| \leq f_m \\ 0, & |f| > f_m \end{cases} \quad (17)$$

图 6 所示为经典瑞利衰落信道模型的多普勒功率谱,实际产生信道的功率谱为 U 型谱,与理论功率谱拟合良好。

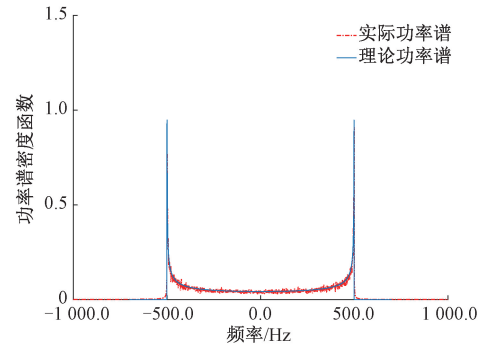


图 6 经典瑞利衰落信道多普勒功率谱密度

Fig. 6 Doppler PSD of classical Rayleigh fading channel

作为对比,图 7 所示为瑞利-平坦、瑞利-高斯、瑞利-巴特沃兹、瑞利-圆拱衰落分布模型的功率谱密度函数。虽然这 4 种衰落分布模型的一阶统计特性均服从瑞利分布,但四者的多普勒功率并不符合 U 型谱,瑞利-平坦的多普勒功率谱为平坦谱,瑞利-高斯的多普勒功率谱为高斯谱,瑞利-巴特沃兹的多普勒功率谱为巴特沃兹谱,瑞利-圆拱的多普勒功率谱为圆拱谱。

目前已有的对衰落信道模型研究仅以一阶统计特性作为瑞利衰落信道的标准化评估依据,该方法不能科学、有效地区分这些衰落信道模型,因此需要同时对信道模型的多普勒功率进行研究,通过分析多普勒功率谱密度,达到鉴别上述各种衰落信道模型的目的。

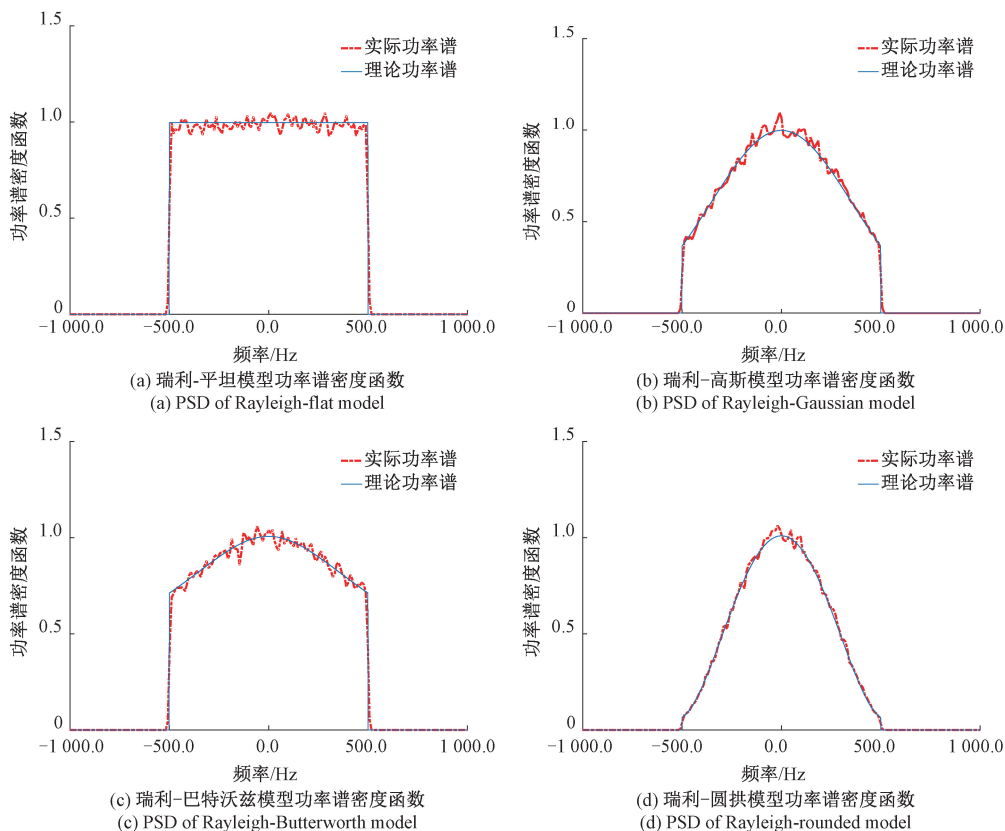


图 7 常见瑞利衰落信道功率谱密度函数

Fig. 7 PSDs of common Rayleigh fading channels

2) 多普勒功率谱密度验证方法

仅凭功率谱密度函数曲线的凹凸程度对函数分布做定性评估的准确度难以保证,根据成形滤波器法所产生信道模型本身存在的系统误差也会对判断带来干扰,因此需要定量的评价标准。为了区分这几种衰落模型的多普勒频谱,考虑对功率谱密度函数做拟合优度检验。假设某点的实际值为 $\bar{y}_i$, 理论值为 y_i , 共有 m 点, 则通常采用均方误差 (mean square error, MSE):

$$MSE = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{i=1}^m (\bar{y}_i - y_i)^2} \quad (18)$$

来衡量误差大小,但是由于采样信道长度 m 中只有最大多普勒频移 (本文设为 500 Hz) 范围内为有效值,在频谱的 ± 500 Hz 以外均为 0, 导致该 MSE 数值太小,为 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 数量级,不利于直观比较和阈值设定,且数量级的差异对归一化处理造成影响,为了消除这种差异对误差统计结果的影响,将差方和除以总能量后的均方能量误差取对数的 dB 形式作为量化研究对象,记为对数均方能量误差 (logarithmic mean square energy error, LMSEE):

$$LMSEE = 20 \times \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m y_i^2} \right) \quad (19)$$

将式 (13) 中计算得到的理论值 $S_1(f)$ 以及根据实际产生信号计算得到的多普勒功率谱密度代入式 (19) 即得到对应的 LMSEE。LMSEE 值越小,表明实际值越接近于理论值,信号拟合程度越高。

对对数均方能量误差进行对比验证,分别计算实际产生的 5 种常见瑞利衰落信道与指定理论多普勒功率谱密度函数的对数均方能量误差,比较分布拟合度就是比较生成对数均方能量误差的大小。一组数据 LMSEE 的大小可以判断稳定性,多组数据 LMSEE 的接近程度可以反应数据拟合程度。仿真验证进行了 20 次,仿真结果如图 8 所示。

从图 8 可看到,当选择经典瑞利模型作为理论衰落模型时,将其与产生的 5 种实际模型作对比的功率谱密度 LMSEE 中,经典瑞利衰落模型的 LMSEE 均小于 -30 dB,而瑞利-平坦、瑞利-高斯、瑞利-巴特沃兹、瑞利-圆拱模型的 LMSEE 均分布在 20 dB 附近,说明产生的 5

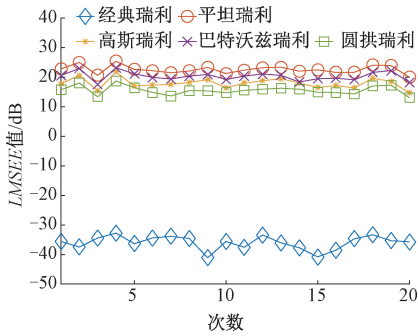
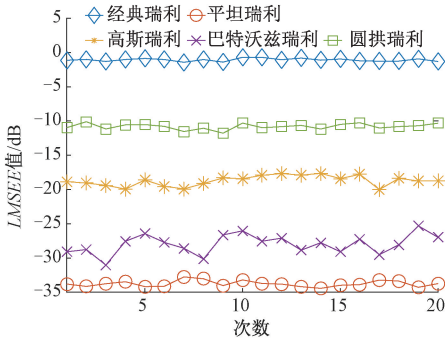
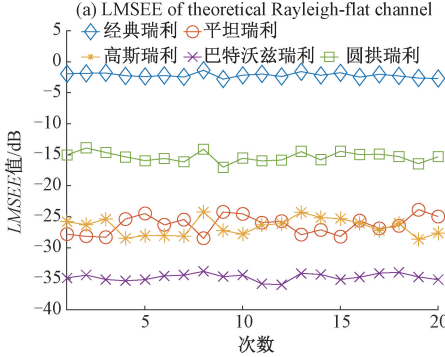


图 8 实际衰落模型与理论瑞利信道 LMSEE 对比

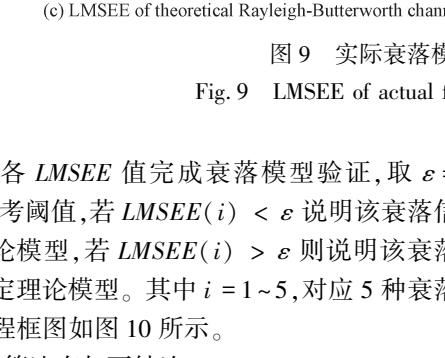
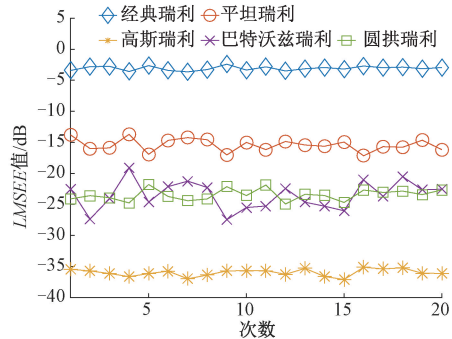
Fig. 8 Comparison of actual fading model with theoretical Rayleigh channel for LMSEE



(a) 理论模型为瑞利-平坦的LMSEE



(b) LMSEE of theoretical Rayleigh-Gaussian channel

(c) 理论模型为瑞利-巴特沃兹的LMSEE
(c) LMSEE of theoretical Rayleigh-Butterworth channel

(d) 理论模型为瑞利-高斯的LMSEE

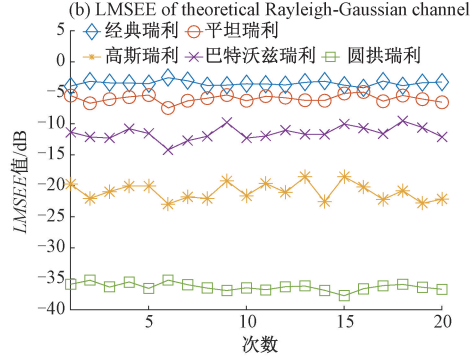
(d) LMSEE of theoretical Rayleigh-arch channel
(d) LMSEE of theoretical Rayleigh-arch channel

图 9 实际衰落模型与理论模型的 LMSEE

Fig. 9 LMSEE of actual fading model and theoretical model

为了识别各 $LMSEE$ 值完成衰落模型验证,取 $\varepsilon = -30$ dB 作为参考阈值,若 $LMSEE(i) < \varepsilon$ 说明该衰落信道符合指定理论模型,若 $LMSEE(i) > \varepsilon$ 则说明该衰落信道不符合指定理论模型。其中 $i = 1 \sim 5$, 对应 5 种衰落模型。识别过程框图如图 10 所示。

综上,本文算法有如下结论:

(1) 特征提取,从给定的衰落信道复序列 $\{h_n\}$ 中提取幅值信息,得到包络的幅值序列 $\{r_n\}$;

(2) 计算差异函数,根据理论概率密度函数的拐点,计算给定信道模型包络幅值序列 $\{r_n\}$ 中幅值小于拐点

种衰落模型中经典瑞利衰落模型与式 (13) 中理论功率谱密度拟合程度最高,其符合式 (13) 的功率谱密度分布,其余 4 种衰落模型则不符合该 U 型谱分布。

为了进一步评估几种常见瑞利衰落模型的衰落特性,分别将瑞利-平坦、瑞利-高斯、瑞利-巴特沃兹、瑞利-圆拱衰落模型的理论功率谱密度 $S_2(f) \sim S_5(f)$ 代入式 (19),计算与实际产生衰落模型的 $LMSEE$,并将多次仿真结果绘制如图 9 所示。多次仿真结果表明,在理论模型确定时,实际衰落模型和理论衰落模型匹配的 $LMSEE$ 远远小于实际衰落模型和理论衰落模型不匹配的 $LMSEE$ 值,一般有 10 dB 的差距,最大可达到 30 dB,可以作为识别衰落信道模型的评价标准。

的统计比例,并与理论模型的统计比例进行对比,得到差异函数值;

(3) 一阶统计特性验证,将得到的差异函数值与设定阈值对比进行验证,若小于阈值则衰落模型的一阶统计特性符合瑞利分布,继续进行步骤 (4),否则,衰落信道一阶统计特性不服从瑞利分布,不是瑞利衰落信道;

(4) 计算多普勒功率谱,提取信道模型自相关系数,做傅里叶变换后得到多普勒功率谱密度函数 $\bar{S}(f)$;

(5) 对数均方能量误差检验判决,对提取到的 $\bar{S}(f)$ 与已知的理论多普勒功率谱密度函数 $S_1(f) \sim S_5(f)$ 分

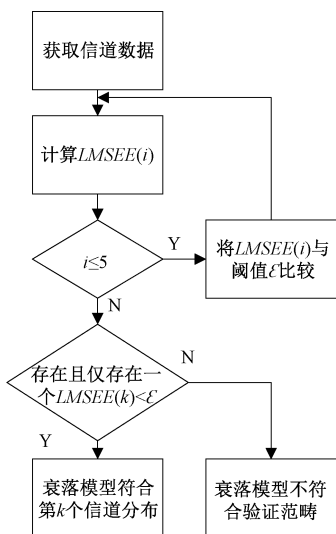


图 10 LMSEE 识别过程框图

Fig. 10 Block diagram of LMSEE recognition process

别求 LMSEE, 然后根据 LMSEE 值判定衰落模型的信道类型。

3 仿真与实物验证

目前常见的信道仿真与分析方法大多为计算机上的纯软件仿真, 完全脱离实际应用环境, 对实际衰落信道描述的可信度低、稳定性差。如图 11 所示, 本文利用市面上成熟的矢量信号发生器 (Rohde-Schwarz 公司的 SMU200 A)、矢量信号收发器 (NI 公司的 PXIe-5644R) 配合计算机仿真软件代替的矢量信号分析仪 (VSA), 搭建起半实物仿真与分析平台。

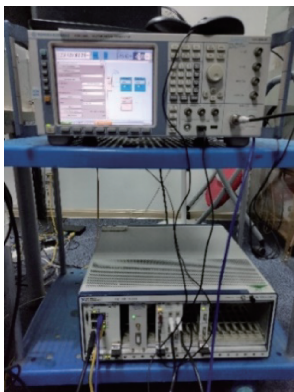


图 11 半实物仿真与分析平台实物图

Fig. 11 Semi-hardware simulation and analysis platform physical diagram

本文对 5 种一阶统计特性为瑞利分布的常见衰落信道模型进行了大量仿真实验, 将一段单载波输入到仿真

信道模型后发送, 再通过接收端接收到 VSA 软件中进行分析, 运行中操作界面如图 12 所示。

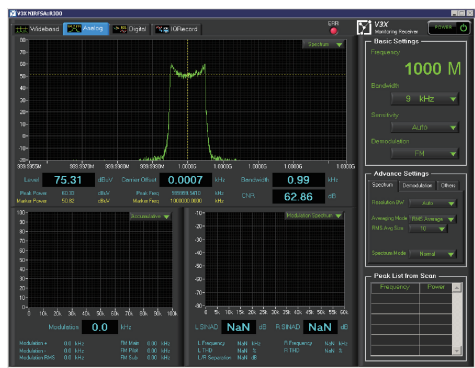


图 12 VSA 操作界面

Fig. 12 VSA operating interface

对每种模型, 仿真实验各进行了 $N=5\,000$ 次, 仿真中设置采样频率为 $f_s=20\text{ kHz}$, 最大多普勒频移为 $f_m=500\text{ Hz}$, 样本长度为 $N_d=10^6$ 。其中, n_{i1} 表示实际信道与理论信道模型吻合的次数, n_{i0} 表示没有任何模型吻合的次数, 正确识别概率 $P_{i1}=n_{i1}/N$, 错误识别概率 $P_{i0}=n_{i0}/N$, $i=1\sim 5$ 分别表示经典瑞利、瑞利-平坦、瑞利-高斯、瑞利-巴特沃兹、瑞利-圆拱五种常见瑞利衰落信道模型。

表 1 所示为本算法对五种常见瑞利衰落信道模型的识别性能。对经典瑞利衰落模型的 5 000 次实验中, 识别失败 58 次, 成功识别次数为 4 942 次, 没有误识别, 识别正确率为 98.84%; 对瑞利-平坦模型的 5 000 次实验中, 正确识别次数为 5 000 次, 没有识别失败和误识别, 识别正确率为 100%; 对瑞利-高斯模型的 5 000 次实验中, 成功识别次数为 5 000 次, 没有识别失败和误识别, 识别正确率为 100%; 对瑞利-巴特沃兹模型的 5 000 次实验中, 正确识别次数为 4 932 次, 识别失败 68 次, 其中误识别为瑞利-平坦模型次数为 63 次, 识别正确率为 98.64%; 对瑞利-圆拱模型的 5 000 次实验中, 成功识别次数为 5 000 次, 没有识别失败和误识别, 识别正确率为 100%。

可见, 本算法正确识别概率符合预期效果, 对经典瑞利和瑞利-巴特沃兹模型的识别概率在 98% 以上, 分别为 98.84% 和 98.64%, 其余模型则均达到了 100%。

4 结论

为了弥补目前对瑞利衰落信道模型评估时只考虑一阶统计特性, 导致无法准确识别几种一阶统计特性均服从瑞利分布的衰落信道模型的问题, 本文提出一种瑞利衰落模型综合验证方法, 先验证衰落模型的一阶统计特

表 1 瑞利衰落信道模型的识别性能

Table 1 Recognition performance of Rayleigh fading channel models

	经典瑞利		瑞利-平坦		瑞利-高斯		瑞利-巴特沃兹		瑞利-圆拱	
	n_{11}	n_{10}	n_{21}	n_{20}	n_{31}	n_{30}	n_{41}	n_{40}	n_{51}	n_{50}
次数	4 942	58	5 000	0	5 000	0	4 932	68	5 000	0
概率	98. 84	1. 16	100	0	100	0	98. 64	1. 36	100	0

性是否符合瑞利分布,然后提取衰落信道模型的多普勒功率谱密度函数后与多种目标理论模型对比,通过比较对数均方能量误差大小判断模型类型。该方法正确识别率高,统计方法简单,具有良好的应用价值。

参考文献

[1] GOKTAS P, TOPCU S, KARASAN E, et al. Evaluating spatial diversity technique for mitigating multipath fading of fixed terrestrial point-to-point systems[C]. 23th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), IEEE, 2015.

[2] ZHOU J, SHEN Y, TANG Y. Performance analysis of energy detection over composite Rayleigh and shadowed fading channels [J]. Electronics Letters, 2012, 48(20) :1309.

[3] TSOURI G R, WAGNER D M. Threshold constraints on symmetric key extraction from rician fading estimates[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(12) :2496-2506.

[4] NAGESH K N, RAMIAH C, PRABHU S M. Statistical analysis for mean communication range under Nakagami fading in wireless ad hoc networks [C]. 2015 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), IEEE, 2015.

[5] ABOU-RJEILY C, BKASSINY M. On the achievable diversity orders over non-severely faded lognormal channels [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(8) :690-697.

[6] REECE S, ROBERTS S. The near constant acceleration gaussian process kernel for tracking [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(8) :707-710.

[7] Tomasevic M, Neskovic A M, Neskovic N J. Artificial neural network based simulation of short-term fading in mobile propagation channel [C]. 22nd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR), 2014: 206-212.

[8] 周玮涵. 无线通信中快衰落信道模型的研究与分析[D]. 南京:南京邮电大学,2016.

ZHOU W H. Studying and analysis of fast fading channel in wireless communications [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016.

[9] JIE Z, CAO Z, KIKUCHI H. Asymmetric geometrical-based statistical channel model and its multiple-input and

multiple-output capacity[J]. Iet Communications, 2014, 8(1) :1-10.

[10] 方坤,何怡刚,黄源,等. 基于 K-S 检验的瑞利衰落信道统计特性评估[J]. 电子测量与仪器学报,2018, 32(8) :36-41.

FANG K, HE Y G, HUANG Y, et al. Evaluation for statistical characteristics of Rayleigh fading channels via Kolmogorov-Smirnov test [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32 (8) : 36-41.

[11] 毕然,何怡刚,史露强,等. 基于卡方检验的莱斯信道统计特性可信性评估[J]. 计算机工程与设计,2019, 40(3) :632-637.

BI R, HE Y G, SHI L Q, et al. Credibility evaluation of Rice channel statistics based on chi-square test [J]. Computer Engineering and Design, 2019, 40 (3) : 632-637.

[12] HUANG C, TANG Y. On the energy efficiency and effective throughput tradeoff of fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65 (4) : 2758-2762.

[13] 刘吉羊,武静,郭晓光,等. 基于 Jakes 模型的机内无线信道建模与仿真[J]. 电光与控制,2017, 24 (2) : 85-88.

LIU J Y, WU J, GUO X G, et al. Modeling and simulation of wireless channel based on Jakes model [J]. Electronics Optics and Control, 2017, 24 (2) : 85-88.

[14] PATZOLD M, RAFIQ G. Performance evaluation of sum-of-cisoids Rice/Rayleigh fading channel simulators with respect to the bit error probability[J]. Radio Science, 2014,49(11).

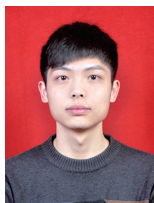
[15] BELLILI F, SELMI Y, AFFES S, et al. A low-cost and robust maximum likelihood joint estimator for the Doppler spread and CFO parameters over flat-fading Rayleigh channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017(99) :1-1.

[16] 周杰,江浩,菊池久和,等. 基于改进的统计信道模型与多天系统性能分析[J]. 物理学报,2014,63(14) : 112-121.

ZHOU J, JIANG H, JUCHI J H, et al. Geometrical statistical channel model and performance investigation for multi-antenna systems in wireless communications [J].

- Acta Physica Sinica, 2014, 63 (14): 112-121.
- [17] 周生奎,戴秀超,朱秋明,等. 无线衰落信道模拟方法及仪器研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(7): 988-994.
- ZHOU SH K, DAI X CH, ZHU Q M, et al. Simulation method for fading channel and emulator development [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29 (7): 988-994.
- [18] 李其昌,刘留,陶成,等. 无线信道测量设备系统响应消除问题研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1878-1887.
- LI Q CH, LIU L, TAO CH, et al. Research on eliminating the system response of wireless channel sounder [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (8): 1878-1887.
- [19] 龚辉. 基于压缩信道感知的超宽带混合信道估计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8): 135-139.
- GONG H. CS-based channel estimation methods for UWB hybrid channel [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38 (8): 135-139.
- [20] 金鑫. 基于 PXI 的无线通信远程实验平台的设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(3): 81-84.
- JIN X. Design of remote wireless communication experimental platform based on the PXI [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34 (3): 81-84.

作者简介



黄继斌, 2016 年于重庆邮电大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为无线通信信道模型。

E-mail: 390635246@qq.com

Huang Jibin received his B. Sc. degree from Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2016. Now he is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interest is wireless communication channel model.



何怡刚 (通信作者), 1992 年于湖南大学获得硕士学位, 1996 年于西安交通大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授、博士生导师, 国家杰出青年基金获得者, 主要研究方向为模拟和混合集成电路设计、测试与故障诊断、智能电网技术、射频识别技术。

E-mail: 18655136887@163.com

He Yigang (Corresponding author) received M. Sc. from Hunan University in 1992, Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1996. He is currently a professor of Hefei University of Technology and one of winners of National Distinguished Young Scientists Foundation. His research interests are in the areas of circuit theory and its applications, testing and fault diagnosis of analog and mixed-signal circuits, smart grid, and radio frequency identification technology.