

## 基于 Jakes 模型的机内无线信道建模与仿真

刘吉羊<sup>1,2</sup>, 武静<sup>2</sup>, 郭晓光<sup>2</sup>, 王晓龙<sup>2</sup>

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000;

2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 为解决目前头盔显示器中存在佩戴舒适性差等问题, 提出采用无线通信技术来代替有线电缆。以机载狭小座舱环境为研究对象, 通过分析无线信号在机载座舱空间内的传输特性, 以 Jakes 模型为基础, 结合飞行员头部运动规律, 提出了一种新的多普勒频移表达式, 并通过 Matlab 对改进的 Jakes 模型进行仿真分析, 从仿真结果看出, 改进 Jakes 模型的自相关函数曲线和互相关函数曲线与理论值更加接近, 具有更好的二阶统计特性, 可以应用于机内无线信道建模研究。

**关键词:** 头盔显示器; 无线通信; 信道仿真; Jakes 模型; 多径传输

**中图分类号:** TN92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2017)02-0085-04

## Modeling and Simulation of Wireless Channel Based on Jakes Model

LIU Ji-yang<sup>1,2</sup>, WU Jing<sup>2</sup>, GUO Xiao-guang<sup>2</sup>, WANG Xiao-long<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471000, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** To solve the problem that the helmet-mounted display is not so comfortable for wearing, we put forward a method to replace the cable with wireless communication technology. Taking the small cockpit environment as the object for study, we analyzed the transmission characteristics of the wireless signal in the cockpit space, and proposed a new Doppler shift expression based on Jakes model together with the head movement regularity of the pilot. Simulation was made with Matlab to analyze the performance of the improved Jakes model. The simulation results show that: the autocorrelation function curve and cross-correlation function curve of the improved Jakes model is more close to the theoretical value, which has better second-order statistics, and is applicable for modeling of the wireless channel.

**Key words:** helmet-mounted display; wireless communication; channel simulation; Jakes model; multi-path transmission

### 0 引言

未来战斗机向长航时、高机动、敏捷性近距格斗方向发展, 直升机、战斗机对高度集成化机载头盔瞄准显示系统在佩戴舒适性、高精度瞄准等方面提出了更高的要求。目前, 国内外大部分飞机的头盔线缆均由多根四同轴视频线缆和多根双绞屏蔽线组成, 线缆较为粗重, 转动灵活性差, 影响飞行员的佩戴舒适性, 头盔

显示器的佩戴舒适性直接影响飞行员战斗力的发挥, 进而对飞机的作战效能产生影响。因此, 为满足未来全天候、高机动飞行作战需求, 飞行员头盔线缆减重是未来发展趋势, 因此有必要在该领域进行专项研究, 如采用无线通信技术来取代现有头盔线缆。

无线通信技术在航空电子领域中的应用已有先例, 例如美军就在 F-22 战机中实现了一条机载无线数据链路。

本文首先分析机载座舱内部无线信号的传输特性, 以 Jakes 模型<sup>[1-2]</sup>作为研究对象, 考虑头部运动存在方位、俯仰、横滚 3 种运动方式, 对多普勒频移表达式进行改进, 提出改进型 Jakes 模型来建立机载座舱无

收稿日期: 2016-10-19

修回日期: 2016-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(61273075)

作者简介: 刘吉羊(1991—), 男, 河南洛阳人, 硕士, 研究方向为无线通信。

线信道,并通过仿真分析其二阶统计特性来验证模型的有效性。

## 1 机载座舱无线信道的特性

### 1.1 无线信道传输机制

在无线通信系统中,电磁波是主要的信息传输载体。在实际传输环境中,由于发射机与接收机之间存在障碍物遮挡,电磁波经反射、散射和绕射才能到达接收端,会产生多径效应,如图1所示。电磁波经不同路径传输后,各分量到达接收端的时间不同,按各自相位相互叠加而造成干扰,使得原来的信号失真,产生不同程度的衰落。

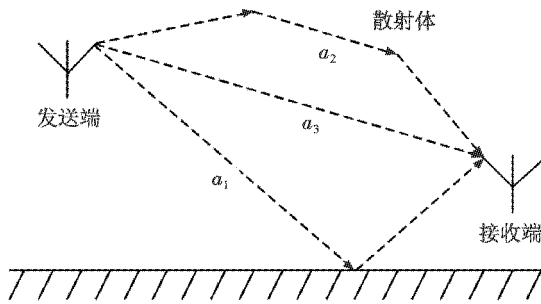


图1 电磁波传输示意图

Fig.1 Schematic diagram of electromagnetic wave transmission

### 1.2 机载座舱无线信道特性

飞机座舱环境属于受限空间,座舱内部空间有限、布局复杂,使得接收端接收到的信号是由机舱内壁及设备反射、散射、绕射形成的合成波,信号会产生明显的畸变、衰减。因此,在研究过程中,必须综合考虑信号的多径效应<sup>[3-4]</sup>、多普勒频移<sup>[5-6]</sup>以及噪声干扰等因素。

#### 1.2.1 多径衰落效应

座舱是一个封闭的近似全金属空间,信号发出后经折射、反射后会产生明显的多径效应。如图2所示,假设收发端之间存在  $N_k$  条传输路径,并且存在直射波,将直射波的传输时延作为参考时延,其衰减系数设为  $A_0$ ,其余入射波的衰减系数设为  $A_i$ ,则机内多径信道模型<sup>[7-8]</sup>为

$$R(t) = \bar{s}_0(t) A_0 \sum_{k=1}^{N_k} a_{0,k} \exp\{-j\theta_{0,k}\} \exp\{j(\omega_0 t - \phi_0)\} + \sum_{i=1}^{N_i} \bar{s}_0(t - t_i) A_i \sum_{k=1}^{N_i} a_{i,k} \exp\{-j\theta_{i,k}\} \exp\{j(\omega_0(t - t_i) - \phi_i)\} \quad (1)$$

式中:  $A_i$  表示信号衰减系数;  $\bar{s}_0(t)$  表示传输时延信号;  $\sum_{k=1}^{N_i} a_{0,k} \exp\{-j\theta_{0,k}\}$  表示多普勒频移;  $\phi_i$  表示电磁波入射相位;  $t_i$  表示相对时延。

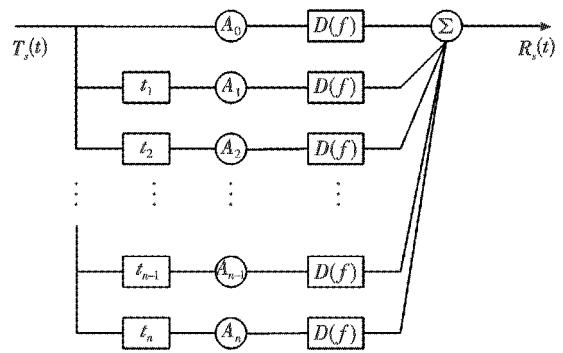


图2 多径效应模型

Fig.2 Multi-path effect model

#### 1.2.2 多普勒效应

本文中,座舱内部发射机位置固定,接收机则由飞行员头部承载,飞行员头部在转动过程中会使接收信号的频率发生偏移,即表现为多普勒效应。飞行员头部在运动过程中主要存在3种运动方式,即方位运动、俯仰运动以及横滚运动,对应3种角速度,即方位角速度  $\omega_\alpha$ ,俯仰角速度  $\omega_\beta$  以及横滚角速度  $\omega_\gamma$ 。实际飞行过程中,飞行员头部转动的最大转动角速度约为  $\omega = 0.84\pi \text{ rad/s}$ ,旋转半径为  $r = 0.14 \text{ m}$ ,则头部转动的线速度约为  $v' = \omega r = 0.37 \text{ m/s}$ ,依据头部转动线速度来确定多普勒频移。

## 2 系统建模

机载座舱可以视为两部分:一部分指飞行员胸部以下,该空间狭小曲折,存在大量的金属和碳纤维材料,以及相应的电子设备等,布局较为复杂;另一部分指飞行员胸部以上,空间相对较为开阔,不存在各种仪器设备。由于本文研究对象为机载头盔,头盔位于座舱上半空间,不存在较为复杂的空间布局,且头盔位于上半空间中心位置,因此信号主要经反射后到达接收端,不存在明显的散射及绕射现象,所以假设接收信号由  $N$  个平面波组成,且具有任意的载频相位、入射方向角以及相等的平均幅度。

理论及数据分析研究表明,多径非视距时,接收信号包络服从瑞利分布,而 Jakes 模型是一款经典的模拟瑞利衰落的仿真模型,因此,本文采用 Jakes 模型进行信道仿真研究。

### 2.1 Jakes 确定模型

Jakes 仿真模型是由 Clarke 模型<sup>[9]</sup>简化生成的模型。假定发射信号垂直极化,发射端与接收端之间存在  $N$  条传输路径,则接收端信号可以表示为

$$R_z(t) = E \sum_{n=1}^N c_n \exp[j(\omega_m t \cos \alpha_n + \varphi_n)] \quad (2)$$

式中,  $\alpha_n, \varphi_n$  均为  $[-\pi, \pi]$  上的独立均匀分布。

令  $c_n = 1/\sqrt{N}$ ,  $\alpha_n = 2\pi n/N$ ,  $\varphi_n = 0$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ , 进一步设定  $N = 4N_0 + 2$ , 则输出信号为

$$R(t) = X_c(t) \cos \omega_c t + X_s(t) \sin \omega_c t \quad (3)$$

式中:

$$X_c(t) = \frac{2}{\sqrt{N}} [\sqrt{2} \cos \omega_m t \cos \beta_{N_0+1} + \sum_{n=1}^{N_0} 2 \cos(\omega_m t \cos \alpha_n) \sin \beta_n]; \quad (4)$$

$$X_s(t) = \frac{2}{\sqrt{N}} [\sqrt{2} \cos \omega_m t \sin \beta_{N_0+1} + \sum_{n=1}^{N_0} 2 \cos(\omega_m t \cos \alpha_n) \sin \beta_n], \quad (5)$$

其中,

$$\omega_m = \begin{cases} \omega_d \cos \frac{2\pi n}{N} & n = 1, 2, \dots, N_0 \\ \omega_d & n = N_0 + 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\beta_n = \begin{cases} \frac{\pi n}{N_0} & n = 1, 2, \dots, N_0 \\ \frac{\pi}{4} & n = N_0 + 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\omega_d = 2\pi f_m = \frac{2\pi v'}{\lambda} \quad (8)$$

## 2.2 Jakes 改进模型

原 Jakes 模型中, 对于多普勒频移的求解建立在水平方位面之内, 即入射角仅由方位角组成, 仅有 1 个自由度。而在机内模型中, 由于飞行员头部在运动过程中会产生方位、俯仰以及横滚 3 种运动方式, 电波会产生 3 种入射角度, 即存在 3 种自由度, 因此, 原有 Jakes 模型并不能很好地体现座舱无线信道特性。

为使所建立的模型能更加贴合机内应用环境, 对于 Jakes 模型做出如下改进。

原 Jakes 模型入射波都是平面波, 均处于平面内, 而在实际中, 飞行员头部在追随目标运动过程中伴随着方位、俯仰以及横滚 3 种运动方式。因此, 本文以机体坐标系(见图 3)为参考坐标系, 以人体头部中心为坐标原点建立模型, 假设头部装置以速度矢量  $\mathbf{v}$  进行转动。

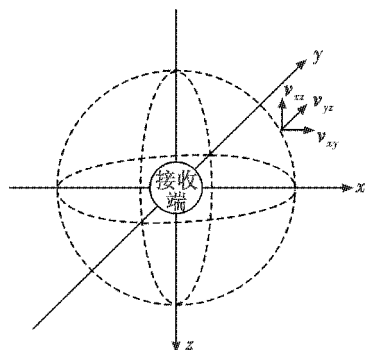


图3 机体坐标系

Fig. 3 Body axis system

将速度矢量  $\mathbf{v}$  分解为对应三参考平面的速度分

量, 即  $\mathbf{v}_{xy}$ ,  $\mathbf{v}_{yz}$  和  $\mathbf{v}_{xz}$ , 以速度分量为轴建立另一坐标系, 新坐标系内各轴向运动速度分别记为  $\mathbf{v}'_{xy}$ ,  $\mathbf{v}'_{yz}$  和  $\mathbf{v}'_{xz}$ , 由于头部运动存在 3 种运动方式, 因此, 令来波入射角对应分别为方位角  $\alpha$ 、俯仰角  $\beta$  和横滚角  $\gamma$ , 分别对应飞行员头部转动过程中的方位运动、俯仰运动以及横滚运动, 则对应的各参考平面的路程差为

$$\begin{cases} \Delta d_x = \mathbf{v}'_{xy} \cdot \cos \alpha \cdot \Delta t \\ \Delta d_y = \mathbf{v}'_{yz} \cdot \cos \beta \cdot \Delta t \\ \Delta d_z = \mathbf{v}'_{xz} \cdot \cos \gamma \cdot \Delta t \end{cases} \quad (9)$$

则总的路程差为

$$\Delta d = \sqrt{\Delta d_x^2 + \Delta d_y^2 + \Delta d_z^2} \quad (10)$$

考虑到飞行员在实际操作过程中, 头部运动主要集中在方位运动与俯仰运动两种运动方式上, 对上式进行约简, 令

$$\begin{aligned} \Delta d &= \sqrt{\Delta d_x^2 + \Delta d_y^2} = \\ &= \sqrt{(\mathbf{v}'_{xy} \cdot \cos \alpha \cdot \Delta t)^2 + (\mathbf{v}'_{yz} \cdot \cos \beta \cdot \Delta t)^2} = \\ &= \sqrt{(\mathbf{v}'_{xy} \cdot \cos \alpha)^2 + (\mathbf{v}'_{yz} \cdot \cos \beta)^2} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (11)$$

假设  $\mathbf{v}'_{xy} = \mathbf{v}'_{yz}$ , 则有

$$\Delta d = \sqrt{\Delta d_x^2 + \Delta d_y^2} = \mathbf{v}'_{xy} \cdot \Delta t \cdot \sqrt{\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta} \quad (12)$$

因为  $\alpha, \beta$  都是随机量, 因此, 不妨令

$$\sqrt{\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta} = \sqrt{2} |\cos \alpha_1 \cos \beta_1| \quad (13)$$

所以, 改进后的多普勒频移表达式为

$$f_d = \sqrt{2} \frac{v}{\lambda} \cos \alpha \cos \beta \quad (14)$$

令  $\alpha = \alpha_{n,k}$ ,  $\beta = \beta_{m,l}$ , 则

$$\alpha_{n,k} = \frac{2\pi n - \pi + \theta_k}{N} + \frac{2\pi(L-k)}{NL} \quad (15)$$

$$\beta_{m,l} = \frac{2\pi m - \pi + \Psi_l}{N} + \frac{2\pi(L-l)}{NL} \quad (16)$$

式中:  $n = 1, 2, \dots, N$ ;  $m = 1, 2, \dots, N$ ;  $L$  为非相关瑞利信道个数;  $\theta_k, \Psi_l \in U[-\pi, \pi)$ 。

## 3 仿真与分析

### 3.1 统计特性

为了验证模型是否可用, 对其统计特性进行分析。

#### 3.1.1 自相关函数

理想 Jakes 模型的同相分量和正交分量的自相关函数满足

$$R_{x_c x_c}(\tau) = R_{x_s x_s}(\tau) = J_0(\omega_m \tau) \quad (17)$$

趋近于第一类零阶贝塞尔函数。

#### 3.1.2 互相关函数

理想 Jakes 模型的同相分量与正交分量的互相关特性满足

$$R_{x_c x_s}(t_1, t_2) = 0 \quad (18)$$

### 3.2 改进 Jakes 模型相关性分析

利用 Matlab 对 Jakes 模型以及改进 Jakes 模型的二阶统计特性进行仿真分析,由于本文中采用 60 GHz 无线收发装置,目前头盔电磁式系统使用频段为 14 kHz,初步实验证明不会对头盔正常状态和功能产生干扰,因此,根据上文分析,取  $f_m = 30$  Hz,  $N_0 = 50$ ,具体仿真结果如图 4 所示。

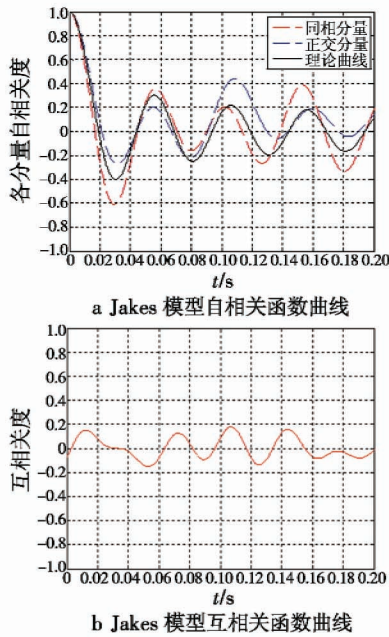


图 4 Jakes 模型仿真结果

Fig. 4 Simulation result of Jakes model

从仿真结果可以看出,原 Jakes 模型同相分量自相关函数和正交分量自相关函数未能与理论曲线保持一致,相差较大;而且其分量的互相关函数也偏离横轴过远,这与理论参考模型不相符。

改进的 Jakes 模型的 3 种函数曲线如图 5 所示。

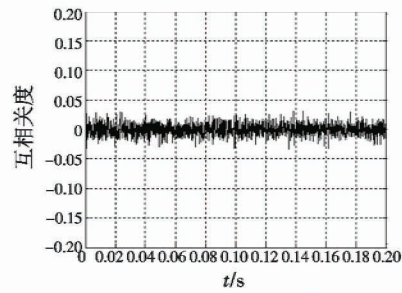
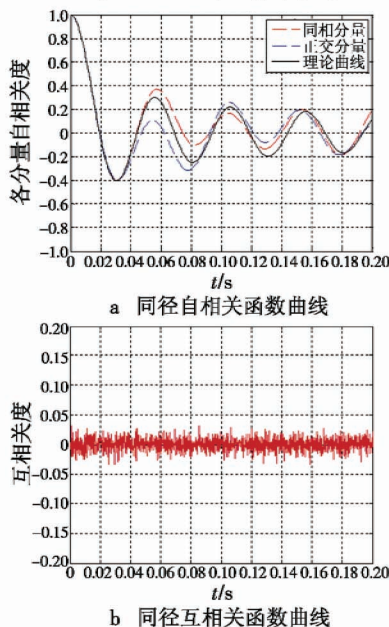


图 5 改进 Jakes 模型的 3 种函数曲线

Fig. 5 Three kinds of function curves of the improved Jakes model

由图 5 可以看出,改进的 Jakes 信道仿真模型的自相关函数曲线与理论曲线基本吻合,同相分量自相关函数与正交分量自相关函数基本重合;同时,同相分量和正交分量互相关函数仅在横轴附近很小范围内波动。从仿真结果可知,本文提出的改进 Jakes 模型能更好地逼近理想的二阶统计特性,可以应用于机载座舱内部无线信道模型研究。

### 4 结语

本文通过对机载座舱环境下信道传输特性进行分析,以 Jakes 模型为基础,提出了一种改进的 Jakes 模型,通过仿真验证证明了改进 Jakes 模型能更加真实、有效地反映座舱内无线传输特性,可以应用于理论建模研究。本文旨在起到一个“催化剂”作用,通过分析座舱内部无线信号传输特性并建立信道模型,为未来头盔显示系统的发展提供一个可能的方向。

### 参考文献

- [1] 朱运航,屈辉立. 一种改进型的无线信道模型研究[J]. 无线通信技术,2011, 20(1): 34-36.
- [2] 张剑东,袁国才. 一种改进的 Jakes' 信道模型及仿真[J]. 舰船电子工程,2012, 32(6): 80-82.
- [3] KASAMPALIS S, LAZARIDIS P I, ZAHARIS Z D, et al. Comparison of Longley-Rice, ITM and ITWOM propagation models for DTV and FM broadcasting[C]//The 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communication ( WPMC ), IEEE, 2013:1-6.
- [4] 李志强,徐锋,李杰英,等. 短波无线信道特性的计算方法及其仿真[J]. 火力与指挥控制,2014, 39(s): 55-58.
- [5] 许从方,丛键. 超短波电台信道模型的仿真研究[J]. 通信技术,2014, 47(7): 733-737.
- [6] 黄成才,何海浪. 高速无线信道建模与仿真[J]. 通信技术,2011, 44(6): 57-58, 61.
- [7] 金鑫. 无线信道传播模型的研究与实现[D]. 北京:北京邮电大学,2010.
- [8] 王小月,何迪. 基于 LTE 的低空空地信道建模与仿真[J]. 信息技术,2014(8): 10-13.
- [9] 刘坤,刘国芳,欧阳海波. 移动通信衰落信道的仿真分析[J]. 舰船电子工程,2009, 29(8): 108-110.