



研究与开发

# 空中转信平台下地空信道的传输特性

付小彬, 郑宝辉

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

**摘要:** 卫星通信解决了全球广域的通信问题, 但不易部署, 星上资源有限, 使用飞行器搭载卫星通信载荷, 在距地不超过 10 km 处构造空中转信平台与地面节点实现互通, 从而弥补了传统卫星通信的不足。针对转信平台与地面通信时电波传输损耗进行分析, 提出了转信平台下的 Ku/Ka 波段宽带信道模型, 理论分析和仿真结果均表明, 该信道的衰落十分明显, 对信息传输性能造成不可忽略的影响。尤其在低仰角传输时, 多径效应使得莱斯因子较小, 应用 OFDM 技术可以对抗多径衰落, 实现转信平台与地面节点之间的宽带通信。

**关键词:** 空中转信平台; 信道模型; 多径效应

**中图分类号:** TN911

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2018023

## Transmission characteristics of air-ground channel in aerial communication platform

FU Xiaobin, ZHENG Baohui

The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China

**Abstract:** Satellite communication can solve the problem of global communication, at the same time, it follows the problems of difficult deploy and limited satellite resources. Aerial communication platform is consisted of aircraft with payload communication and not more than 10 km from ground. The platform communicating with ground nodes can solve the weakness of traditional satellite communication. The loss of air-to-ground channel was analyzed to model the air-to-ground wideband channel in Ku and Ka band. The consequence of theory and simulation demonstrates that the fading of the model has serious influence on transmission performance. In low elevation transmission, the value of  $K$ -factor is small because of multipath reception. Simulation results show that orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) can be a good candidate for wideband communications to transmit payload data from aerial platform to ground station.

**Key words:** aerial communication platform, channel model, multipath effect

### 1 引言

空中转信平台是利用升空飞行器搭载通信载荷, 通过空中中继或交换, 从而实现多个地面站之

间信息交换的一种通信方式。其实质是采取升高通信载荷的方法, 变超视距通信为视距通信。空中转信平台具有宽传输带宽、易于组网和机动灵活等特点<sup>[1]</sup>。转信平台的升空高度不超过 10 km, 要实现较

收稿日期: 2017-09-07; 修回日期: 2017-12-10



大的通信覆盖半径, 会存在低仰角通信, 使得接收信号幅度以及功率在很短的时间内发生快速变化, 对传输性能产生较大的影响。本文通过分析不同仰角下地空信号的衰落类型<sup>[2]</sup>, 在地面信道和航空信道模型的基础上对 Ku/Ka 转信平台信道进行建模, 仿真其传输特性并采用 OFDM 技术进行传输性能的改善。

## 2 无线信道衰落模型

无线信道衰落类型主要有大尺度衰落和小尺度衰落<sup>[3]</sup>。转信平台下的大尺度衰落主要包括非常慢的自由空间损耗和比较慢的阴影衰落, 小尺度衰落主要考虑低仰角时的多径效应引起的时延扩展和多普勒频移。

### 2.1 大尺度衰落

转信平台存在时变的自由空间传播损耗, 按式 (1) 计算:

$$L_p = \left( \frac{4\pi d}{\lambda_c} \right)^2 = \left( \frac{4\pi d f_c}{c} \right)^2 \quad (1)$$

其中,  $d$  是传播距离 (km),  $f_c$  是载波频率 (GHz)。自由空间损耗与仰角大小成反比关系, 平台处于 10 km 高度时, 不同仰角下自由空间损耗的变换情况如图 1 所示。

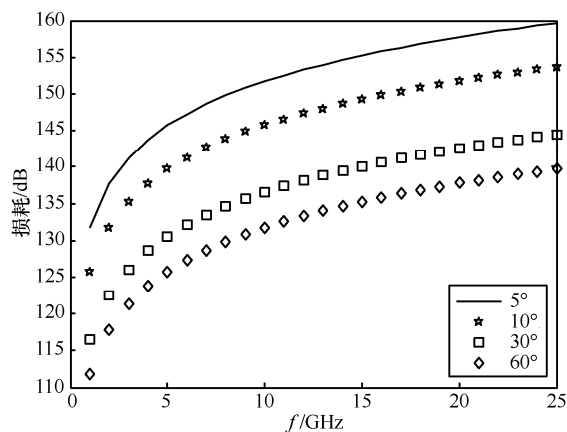


图 1 不同仰角下自由空间损耗的变换情况

由于电波遇到遮挡传播路径的障碍物时, 障碍物后面就会形成电波的阴影, 在阴影区内接收

信号强度会发生变化, 产生阴影衰落<sup>[4]</sup>。在阴影衰落中, 路径损耗的统计特性通常符合对数正态分布:

$$PL(\text{dB}) = \overline{PL}(d_0) + 10n \lg \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (2)$$

其中,  $d_0$  是一个参考距离,  $n$  为路径损耗指数,  $X_\sigma$  是均值为 0、标准差为  $\sigma$  的高斯随机变量。 $n$  主要是由传播环境决定的, 具体取值见表 1。对于不同的传播环境需要确定合适的参考距离  $d_0$ 。

表 1 不同环境下的路径损耗指数

| 环境        | 路径损耗指数  |
|-----------|---------|
| 自由空间      | 2       |
| 市区蜂窝      | 2.7~3.5 |
| 建筑物内视距传输  | 1.6~1.8 |
| 建筑物内障碍物阻挡 | 4~6     |

该模型允许在相同距离  $d$  处的接收机具有不同的路径损耗, 如图 2 所示, 并且随着阴影变量  $X_\sigma$  的变化而变化。

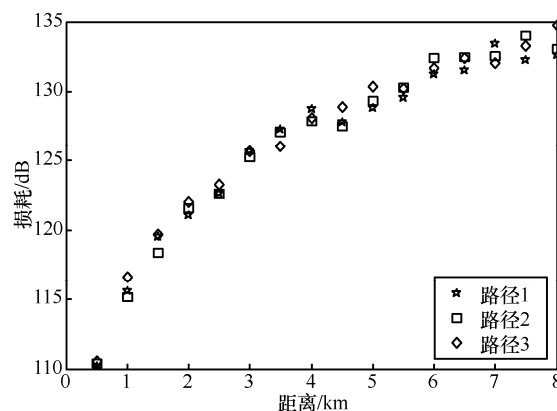


图 2 对数正态阴影路径损耗模型

### 2.2 小尺度衰落

小尺度衰落是指信号的幅度和相位在短距离或者短时间内快速地变化。对于转信平台而言, 小尺度衰落是由多径效应引起的多径时延和多普勒频移。假设无线传播信道满足宽平稳不相关散射 (WSUSS) 理论, 信道具有时间、频率色散特性, 色散特性可由信道的时延功率谱和多普勒功

率谱描述<sup>[5,6]</sup>。针对信道的时变特性进行建模,可将信道的冲激响应函数 $h(t, \tau)$ 视为参数为 $t$ 的广义平稳随机过程,其自相关函数为:

$$R_{hh}(\tau_1, \tau_2, \alpha) = E\{h^*(\tau_1, t)h(\tau_2, t + \alpha)\} \quad (3)$$

在WSUSS模型中,用 $R_{hh}(\tau, \alpha)$ 表示自相关函数,则有:

$$R_{hh}(\tau, \alpha) = E\{h^*(\tau_1, t)h(\tau + \alpha)\} \quad (4)$$

对自相关函数进行傅里叶变换,得到衰落信道的频域模型,功率谱密度可表示为:

$$S(\tau, f) = F\{R_{hh}(\tau, \alpha)\exp(-j2\pi f\alpha)d\alpha\} \quad (5)$$

其中, $S(\tau, f)$ 是由时域变量 $\tau$ 和多普勒频移变量 $f$ 构成的散射函数,通过散射函数可以得到 $P(\tau)$ (时延功率谱)和 $P_{f_D}(f_D)$ (多普勒功率谱)分别为:

$$P(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, f) df \quad (6)$$

$$P_{f_D}(f_D) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, f) d\alpha \quad (7)$$

根据实测,时延功率谱密度一般服从单边指数分布,即:

$$P(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{T} e^{-\frac{\tau}{T}}, 0 \leq \tau \leq \infty \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $T$ 是常数,表示多径时延的平均值。

假设地面是全向天线,并且周围的反射体均匀分布时,信号多普勒频率的范围为 $-f_{D_{\max}} \leq f_D \leq f_{D_{\max}}$ ,多普勒功率谱一般服从经典多普勒概率密度(也称Jakes谱、U型谱):

$$P_{f_D}(f_D) = \begin{cases} \frac{1}{\pi f_{D_{\max}} \sqrt{1 - \left(\frac{f_D}{f_{D_{\max}}}\right)^2}}, -f_{D_{\max}} \leq f_D \leq f_{D_{\max}} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

地面站采用定向天线时,地面站和飞行器所接收信号的到达方向均可认为限制在一定角度

内,只是角度扩展范围的不同导致多普勒功率谱变化范围有所不同,当地面站弥散分量由一簇很窄的波束组成,且来波均匀,则弥散径的多普勒功率谱仅为U型谱中的一部分:

$$P_{f_D}(f_D) = \begin{cases} \frac{1}{(\phi_{a_H} - \phi_{a_L})f_{D_{\max}} \sqrt{1 - \left(\frac{f_D}{f_{D_{\max}}}\right)^2}}, -f_{D_{\max}} \leq f_D \leq f_{D_{\max}} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\phi_{a_H}$ 、 $\phi_{a_L}$ 分别为最大和最小飞行速度方向的多径信号分量的角度。相关系数至少为0.5的时间持续段内,多普勒频移 $f_D$ 与相干时间 $T_0$ 的关系为:

$$T_0 = \frac{9}{16\pi f_D} \quad (11)$$

当信号的相干时间大于码元持续时间时,信道为快衰落信道;反之,则为慢衰落信道。

### 3 转信平台信道模型和仿真分析

转信平台多径信道模型可以用一个时变复低通等效冲激响应表示:

$$h(t, \tau) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l(t) \delta(t - \tau_l) \quad (12)$$

其中, $\tau_l$ 、 $a_l$ 是每条多径的时延和幅度增益, $L$ 是多径数目,如果LOS存在,直射路径 $a_0(t)$ 的计算式为:

$$a_0(t) = a \cdot e^{j2\pi f_{\text{LOS}} kT} \quad (13)$$

其中, $f_{\text{LOS}}$ 是直射径的多普勒频移, $T$ 是信道抽样间隔, $a$ 是服从莱斯分布的随机变量。所有其他的非直射分量为:

$$a_l(t) = \sum_{n=1}^N a_n e^{j\vartheta_n} \cdot e^{j2\pi f_D kT} \cdot g_{\text{total}}(iT - \tau_n) \quad (14)$$

其中, $N$ 非直射路径的总数, $a_n$ 是第 $n$ 条路径服从瑞利分布的振幅, $\vartheta_n$ 是第 $n$ 条路径的随机相偏, $f_D$ 是第 $n$ 条路径的多普勒频移, $\tau_n$ 是时延, $g_{\text{total}}$ 是



发射机和接收机之间所有滤波器的冲激响应之和。莱斯因子定义为直射分量功率和所有散射分量功率总和的比值：

$$K = \frac{A^2}{2\sigma^2} \quad (15)$$

当莱斯因子较大时，多径分量较少，信号趋于高斯分布；莱斯因子较小时，多径分量较多，信号趋于瑞利分布<sup>[7,8]</sup>。

转信平台在 Ku/Ka 频段工作，地面站采用 0.5 m 定向天线时，主瓣宽度  $BW_{0.5} \approx 2.8^\circ/1.1^\circ$ ，第一旁瓣电平  $FSL = -13.5 \text{ dB}$ <sup>[9]</sup>。地面天线定向性较好时，由于主瓣宽度和旁瓣电平较小，转信平台信道可认为由一条 LOS 径和一簇经反射、散射以及时延的复合径组成<sup>[10]</sup>，根据多径时延可以建立平坦衰落信道和频率选择性衰落信道。

测控信道通常采用窄带通信系统，目前对于空中转信平台的宽带通信系统应用较少，缺乏实测数据建立信道模型，本文结合地面宽带系统和航空窄带系统的信道模型和实测数据，进行信道建模，为转信平台下传输体制的选择提供信道模型。（说明：结合参考文献，推导转信平台公式和信道模型，进行仿真。）

### 3.1 高仰角信道

当转信平台的高度为 10 km 时，参考文献[11]将飞机仰角低于  $10^\circ$  时称为低仰角阶段，仰角越大，直射径和弥散径的功率比越大，根据参考文献[11]，高仰角时的直射分量较强，莱斯因子不低于 20 dB。此时的散射分量较少，多径时延也相对较小，一些测量结果<sup>[11]</sup>表明最大时延  $\tau_{\max} = 5 \mu\text{s}$ ，相较于 LOS 径的路程差  $\Delta d = 2100 \text{ m}$ 。

由式 (9) 可知，时延  $\tau_{\max} = 5 \mu\text{s}$  时，相对于主径的功率为 -25 dB，计算平均附加时延为：

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_i p(\tau_i) \tau_i}{\sum_i p(\tau_i)} = \frac{0 \times 1 + 5 \times (10^{-2.5})}{1 + 10^{-2.5}} = 0.016 \mu\text{s} \quad (16)$$

二阶附加时延为：

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_i p(\tau_i) \tau_i^2}{\sum_i p(\tau_i)} = \frac{5^2 \times (10^{-2.5})}{1 + 10^{-2.5}} = 0.08 \mu\text{s}^2 \quad (17)$$

计算均方时延扩展为：

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - \langle \bar{\tau} \rangle^2} = \sqrt{0.08^2 - 0.016^2} = 0.048 \mu\text{s} \quad (18)$$

如果定义相干带宽  $f_0$  为一个频率间隔，在该间隔内信道的复频率传递函数的相关系数达到 0.5 时，有：

$$f_0 = \frac{1}{5\sigma_\tau} = 200 \text{ MHz} \quad (19)$$

如果  $f_0 = \frac{1}{T_s}$  时，则称信道是频率选择性信道，

这里的码元速率通常取信号传输速率或信号带宽  $W$ 。地面节点的信号带宽小于相干带宽，信道为平坦衰落；转信平台移动速度为 440 km/h 时，最大多普勒频率为 2757 Hz，由于转信平台采用 Ku/Ka 频段，频点较高，因此飞行器的时变特性表现为慢衰落。信道模型如图 3 所示。

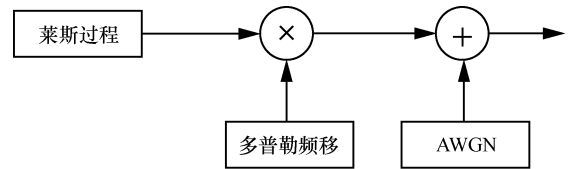


图3 平坦慢衰落信道模型

### 3.2 低仰角信道

低仰角下，地面站接收的散射和反射分量较多，莱斯因子较小，根据参考文献[11]中测试数据，将  $K$  定义为：

$$K = \frac{0.91^2}{0.41^2} = 6.9 \text{ dB} \quad (20)$$

低仰角下，由几何关系得出地空信道的最大路径差  $\Delta d = h$ ，仰角为  $10^\circ$  时， $h = 57 \text{ km}$ ， $\tau_{\max} = 190 \mu\text{s}$ ，由式 (9) 可得，相对于主径的功率为 -6.9 dB，平均附加时延  $\bar{\tau} = 32.22 \mu\text{s}$ ，二阶附加时延  $\overline{\tau^2} = 6.12 \text{ ms}$ ，均方时延扩展  $\sigma_\tau = 6 \text{ ms}$ ，

相干带宽  $f_0=33$  Hz。对于转信平台下的宽带通信,低仰角下的相干带宽小于信号带宽,信道为频率选择性衰落信道,多普勒频移与高仰角下相似,仍为慢衰落模型。

低仰角下转信平台信道仿真模型采用抽头时延线来模拟,由于接收信号是一些随机向量的叠加,每个振幅将呈现出莱斯或瑞利分布,特别是转信平台覆盖下,通常存在一个莱斯分布的路径,因此可以建立基本的频率选择性衰落模型。莱斯瑞利频率选择性衰落信道模型的可分辨径分别由莱斯过程和瑞利过程来模拟,如图4所示。

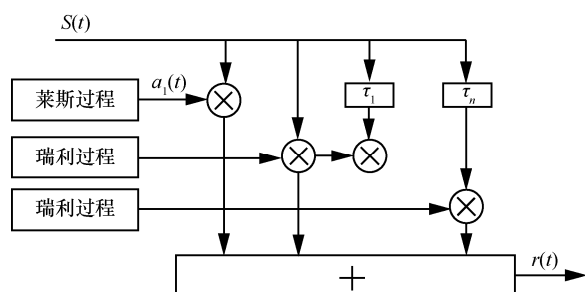


图4 莱斯-瑞利频率选择性衰落信道仿真模型

### 3.3 OFDM 仿真分析

OFDM 具有频带利用率高、抗多径能力良好、带宽扩展性强、频谱资源分配灵活等特点,能很好地克服低仰角下转信平台的多径效应,在文中建立的转信平台信道模型中进行 OFDM 传输仿

真,分析传输性能,为转信平台下 OFDM 传输系统的设计提供参考。

如图5所示,低仰角通信时,采用参数为128个载波、QPSK调制、载波频率为13.75 GHz和200 MHz带宽的OFDM在频率选择性衰落信道下进行仿真,QPSK在误码率为 $10^{-4}$ 时信噪比与高斯信道下相差13 dB,OFDM技术在多径信道下传输,可以减少多径效应的影响。

频率选择性衰落信道下的OFDM传输误码率曲线如图6所示。由图6可知,在低仰角状态下,转信平台的速度对OFDM传输性能影响较大,速度较大引起的多普勒频移会引起相邻载波干扰,影响OFDM的正交性,使误码率下降,横向比较载波数 $N=128$ 和 $N=256$ 可知:在低仰角时低速飞行,当速度较大时可以用较少载波来对抗多普勒频移,提高误码性能。

### 3.4 结论与分析

结合航空窄带信道和地面宽带系统的实测数据,对转信平台传输信道进行建模,分析信道的时延功率谱和多普勒功率谱,当地面天线仰角较大(大于 $15^\circ$ )时,地空信道为准高斯信道,此时可以选择高阶调制解调,实现信息的高速稳定传输;仰角较小(小于 $10^\circ$ )时,地空信道为频率选择性信道,采用OFDM技术进行信息传输,实现

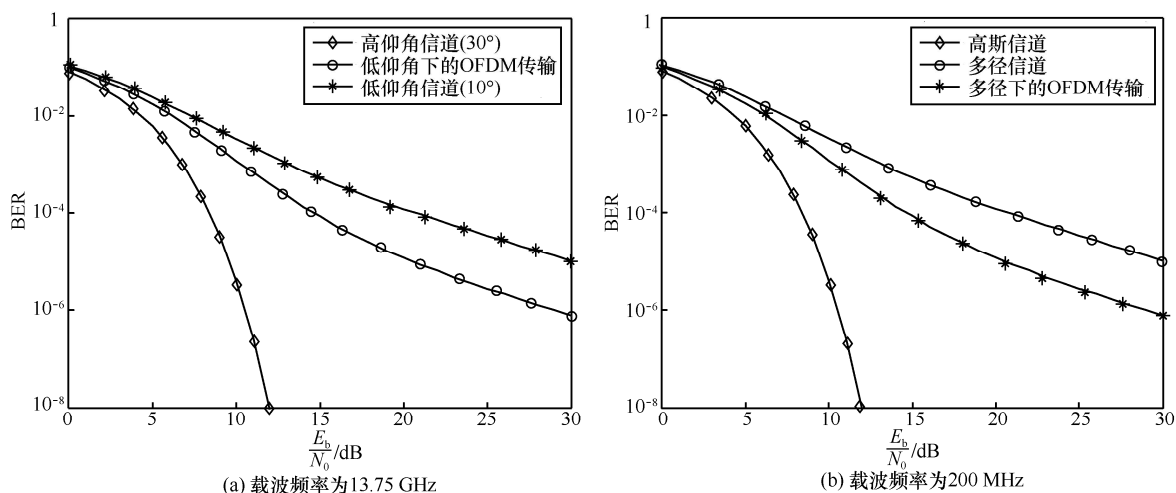


图5 QPSK在不同信道下的误码率曲线

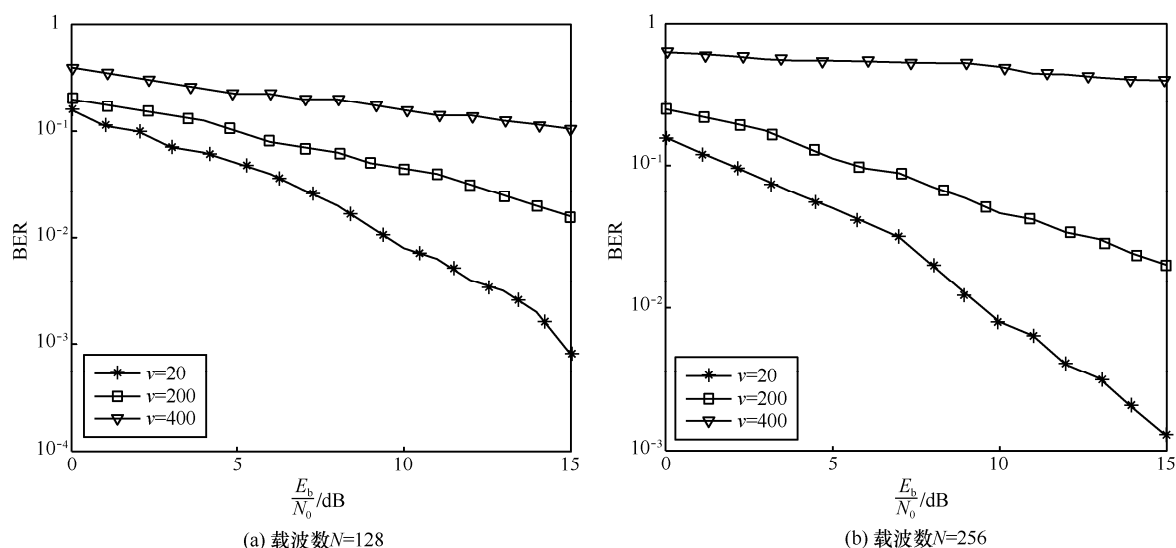


图6 频率选择性衰落信道下的 OFDM 传输误码率曲线

多径信道下的高速数传<sup>[12]</sup>；仰角在  $10^\circ \sim 15^\circ$  时，通过莱斯因子  $K$  的大小表征信道质量的好坏程度， $K$  值一般大于 20 dB。

#### 4 结束语

本文提出了 Ku/Ka 频段下转信平台信道传输体系，由于宽带高空通信数据较少，结合窄带航空信道和地面宽带系统，建立了转信平台下的信道模型，模型中的参数可以调节，为不同的仰角下信号的传输体制选择提供仿真模型。高仰角下，转信平台传输信道为理想模型，可利用高阶调制实现高速数传；低仰角下，OFDM 技术将一个高码元速率的信息序列分割为  $N$  个码元组，使每个码元组的码元速率降低，当其小于信道相干带宽时，多径带来的影响较小，为转信平台传输体制的设置提供参考。

#### 参考文献：

[1] 高自新, 徐文娟. 地空信道传输特性与技术分析[J]. 无线电过程, 2012, 42(2): 10-13.  
GAO Z X, XU W J. Analysis on transmission characteristics and technologies of ground-to-air channel[J]. Radio Engineering, 2014, 42(2): 10-13.

[2] 费满锋, 易克初, 刘祖军. 一种新颖的宽带地空通信系统方案[J]. 西安电子科技大学学报, 2008, 35(3): 403-408.  
FEI M F, YI K C, LIU Z J. Novel scheme for the wide band ground-air communication system[J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(3): 403-408.  
[3] 谢益溪. 无线电波传播——原理与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.  
XIE Y X. Radio propagation—theory and application[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2008.  
[4] 张晓佳. 阴影衰落的建模与分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2014.  
ZHANG X J. Modeling and analysis of shadow fading[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2014.  
[5] HOEHER P. A statistical discrete-time model for the WSSUS multipath channel[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1992, 41(4): 461-468.  
[6] BELLO P. Characterization of randomly time-variant linear channels[J]. IEEE Transactions on Communications Systems, 1963, 11(4): 360-393.  
[7] DAVID W M, RUOYU S. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems—part iii: the suburban and near-urban environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, PP(99): 1.  
[8] HAAS E. Aeronautical channel modeling[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(2): 254-264.  
[9] 毕奇, 谢伟良, 陈鹏, 等. LTE 多天线技术发展趋势[J]. 电信科学, 2014, 30(10): 1-7.  
BI Q, XIE W L, CHEN P, et al. Progress and trends of multiple

antennas technology in LTE network[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(10): 1-7.

- [10] 陈山枝. 发展 5G 的分析与建议[J]. 电信科学, 2016, 32(7): 1-10.

CHEN S Z. Analysis and suggestion of future 5G directions[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(7): 1-10.

- [11] YI G, GE J, GANG L. Simulation implementation of the aeronautical channel in dynamic environment with low elevation angle[J]. Nature Medicine, 2010, 18(7): 1014-1016.

- [12] VAHIDI V, SABERINIA E. Orthogonal frequency division multiplexing and channel models for payload communications of unmanned aerial systems[C]//International Conference on Unmanned Aircraft Systems, June 7-10, 2016, Arlington, USA. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1156-1161.

#### [作者简介]



付小彬（1991-），男，中国电子科技集团公司第五十四研究所工程师，主要研究方向为信号与信息处理。



郑宝辉（1964-），男，博士，中国电子科技集团公司第五十四研究所研究员，主要研究方向为卫星通信系统。