

Research on Forecast Communication Channel Model of High Speed Near Space Vehicle

YUAN Xudong^{1,3}, ZHAO Hongli², YANG Haitao⁴

1. Company of Postgraduate Management, the Academy of Equipment Command & Technology, Beijing, China

2. Headquarters of General Equipment, Beijing, China

3. Beijing Aerospace Control Centre, Beijing, China

4. The Key Lab, the Academy of Equipment Command & Technology, Beijing, China

e-mail: yuanxudong208@yahoo.com.cn

Abstract: Communication structure of High Speed Near Space Vehicle (HSNSV) is introduced. Base on the structure, communication between HSNSV and HSNSV, HSNSV and satellite, HSNSV and earth station is researched respectively integrated with characteristic and communication environment of HSNSV. And corresponding forecast communication channel models are presented.

Keywords: Near Space; HSNSV; communication structure; forecast communication channel model

高速临近空间飞行器通信信道预测模型研究

原旭东^{1,3}, 赵洪利², 杨海涛⁴

1. 装备指挥技术学院研究生管理大队, 北京, 中国, 101416

2. 总装备部司令部, 北京, 中国, 100720

3. 北京航天飞行控制中心, 北京, 中国, 100094

4. 装备指挥技术学院重点实验室, 北京, 中国, 101416

e-mail: yuanxudong208@yahoo.com.cn

【摘要】介绍了高速临近空间飞行器的通信结构, 基于该通信结构, 结合高速临近空间飞行器的特点和所处的通信环境, 对高速临近空间飞行器之间, 高速临近空间飞行器同卫星以及高速临近空间飞行器同地面之间的通信进行了研究, 并给出了相应的通信信道预测模型。

【关键词】临近空间; 高速临近空间飞行器; 通信结构; 信道预测模型

高速临近空间飞行器 (High Speed Near Space Vehicle, HSNSV) 一般指速度大于等于 3 马赫的临近空间飞行器^[1]。凭借其快速到达能力, 高速临近空间飞行器已成为世界航空航天大国争相发展的对象。作为高速临近空间飞行器的典型代表, X-43A 验证机于 2004 年成功试飞, 其飞行高度达 33 千米, 创造了 9.8Ma 的飞行速度。本文从高速临近空间飞行器的通信结构和特点出发, 分别研究了高速临近空间飞行器之间、高速临近空间飞行器同卫星、以及高速临近空间飞行器同地面的通信信道预测模型。本文的工作对于当前没有实测数据的情况下进行高速临近空间飞行器通信技术的研究具有重要意义。

1 高速临近空间飞行器通信结构及特点

图 1 所示为高速临近空间飞行器通信结构示意图。如图所示, 高速临近空间飞行器的通信结构包括

高速临近空间飞行器之间、高速临近空间飞行器与地面以及高速临近空间飞行器与卫星通信链路。由于收发双方的相对运动使得高速临近空间飞行器的通信信道为时变信道, 自由空间损耗和多普勒频移是高速临近空间飞行器通信信道的主要特点。

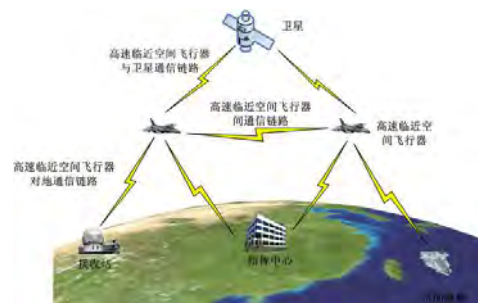


Figure 1. HSNSV communication structure

图 1. 高速临近空间飞行器通信结构示意图

2 高速临近空间飞行器间通信信道预测模型

高速临近空间飞行器间通信信道预测模型主要考虑两方面的因素：一是临近空间环境对通信的影响，二是高速对通信的影响。

2.1 临近空间环境特征

临近空间环境研究是建立高速临近空间飞行器间通信信道预测模型的重要前提。气候特征，密度和压力特性都会在一定程度上引起信道衰落。

(1) 气候特性。临近空间处在对流层之上，气候条件稳定。这一区域不会发生云、雨、雷暴等强烈的天气现象。

(2) 密度特性。临近空间的大气密度极其稀薄，在 20km 高度附近的大气密度约为地面的 7.3%，随着高度上升，大气密度继续下降，30km 高度的大气密度约为地面的 1.5%。更高的中间层的空气更加稀薄，其空气质量约只占整个大气层的 1/3000。在 80km 高度上，空气的密度只有地面的五万分之一。

(3) 压力特性。在 20km 高度附近的大气压力约为地面的 5.3%，随着高度上升压力下降，到 30km 高度时约为地面的 1.1%。

临近空间稳定的气候特征说明临近空间范围内通信的降雨损耗和云雾损耗可以忽略，而其稀薄的大气密度和较低的大气压力可以认为所有频段的无线电波在临近空间传播时，都可以近似地看作在真空中传播。

2.2 高速运动对通信的影响

高速临近空间飞行器在飞行过程中与周围空气的剧烈摩擦会对空气产生压缩，使飞行器周围的空气温度急剧上升。当温度增加到一定程度就会引起电离(如 $\text{NO} \leftrightarrow \text{NO}^+ + \text{e}^-$ ，氧原子 $\text{O} \leftrightarrow \text{O}^+ + \text{e}^-$)。电离的程度和过程是随气体温度变化而变化的^[2]。由于高温空气电离，在飞行器周围可能构成等离子体鞘，它的等离子体振荡频率就是无线电截止频率，造成无线电波的衰减⁰。引起电离的温度因不同飞行器的飞行轨迹和表面材料而异。文献[2]提出当气体温度达到 9000K 时会引起电离，文献[4]提出当气体温度大于 6000K 时，分子与原子之间强烈的碰撞会使气体发生电离。

表 1 提供了对高超音速飞行器表面温度估计值，文献[4]采用基于热流量平衡方程的工程估算方法和二维薄层近似 N-S 方程数值模拟对高超音速飞行器进行气动加热计算，根据其仿真结果，当飞行高度

H=20km，飞行马赫数 Ma=5，飞行迎角 $\alpha=10^\circ$ 时，X-33 表面最高温度小于 700K；而当飞行高度 H=53km，飞行马赫数 Ma=11.44，飞行迎角 $\alpha=35.8^\circ$ 时，X-33 表面最高温度小于 1600K。

Table 1. Surface temperature estimate

表 1. 表面温度估计^[2]

飞行器	马赫数 M	T/K
Convair B-58	2	420
North American XB-70	3	550
North American X-15	6	900
Waverider	8-10	1000
Waverider	25	1650
Space Shuttle	25	1500
ICBM	20-25	6000

对比表 1 和文献[4]的仿真结果，可以分析得出高速临近空间飞行器在运动时表面温度一般小于 6000K，空气不会发生电离，因而可以忽略高速运动对无线电波的衰减。

2.3 预测模型

通过分析临近空间环境特征可知临近空间范围内的大气衰减可以忽略，而 HSNSV 的高速运动不会引起周围空气电离而造成衰减，同时，高速临近空间飞行器间的通信都是直射路径，不存在多径和阴影衰落，因而高速临近空间飞行器间信道预测模型可以近似的看作多普勒效应下的自由空间传输模型。

3 高速临近空间飞行器与卫星通信信道预测模型

高速临近空间飞行器与卫星之间的通信需要经过临近空间，电离层和太空，其通信示意图如图 2 所示。根据 2.1 节的分析可知，临近空间范围内的通信可近似看作真空处理。对于电离层，VHF 以上频率的无线电波可以忽略电离层的影响，而 ITU 分配给临近空间的通信频率都在 VHF 之上，因而电离层对通信的吸收损耗也可忽略不计。而如果忽略宇宙背景噪声的影响，大气层外的通信电波传播可以看作自由空间传播。再者，高速临近空间飞行器与卫星的通信不存在多径和阴影衰落，因而高速临近空间飞行器与卫星通信信道预测模型可以近似的看作多普勒效应下的自由空间传输模型。

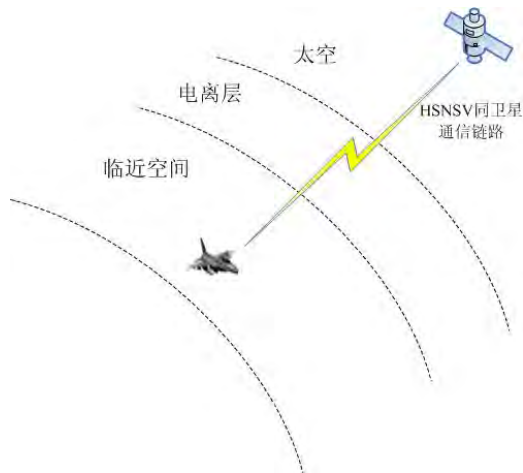


Figure 2. Communication path between HSNSV and satellite
图 2. 高速临近空间飞行器与卫星通信示意图

4 高速临近空间飞行器与地面通信信道预测模型

高速临近空间飞行器与地面通信时, 受地表环境的影响会遇到各种物体, 经反射、散射、绕射等到达接收天线, 其电波传播示意图如图 3 所示。

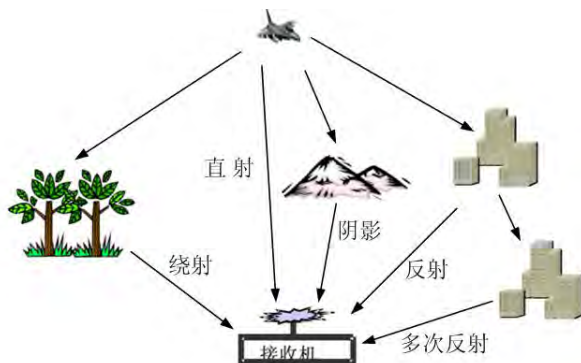


Figure 3. Electric wave spread between HSNSV and earth
图 3. 高速临近空间飞行器对地通信电波传播示意图

高速临近空间飞行器与地面通信的信道模型同地表环境密切相关, 参考卫星移动信道分析模型, 可将高速临近空间飞行器与地面通信信道预测模型分为三种情况:

4.1 开阔地环境模型

在开阔地环境中, 可认为高速临近空间飞行器与地面通信路径上没有障碍物, 地面接收信号由无遮蔽的直射分量和符合瑞利分布的多径信号组成, 其包络服从莱斯衰落分布, 其概率密度函数如下式所示。

$$P_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{r^2 + a_d^2}{2\sigma^2}\right\} I_0\left(\frac{ra_d}{\sigma^2}\right), r \geq 0 \quad (1)$$

其中, $I_0()$ 是贝塞尔(Bessel)函数, σ^2 为莱斯过程的方差。

4.2 城区环境模型

在城区环境下, 高速临近空间飞行器与地面之间通信的直射路径几乎被完全阻挡, 因此可认为地面接收信号包络服从瑞利分布, 其概率密度函数如下式所示。

$$P_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right\}, r \geq 0 \quad (2)$$

其中 σ^2 为瑞利过程的方差

4.3 乡村(郊区)环境模型

在乡村和郊区, 高速临近空间飞行器与地面通信存在直射分量, 且受到阴影和多径混合衰落的影响。根据阴影衰落对多径分量影响的有无可将乡村(郊区)环境模型分为部分阴影模型和全阴影模型。

文献[5]提出了平流层通信的衰落信道统计模型, 可以适用于部分阴影模型。部分阴影模型的其概率密度函数如下式所示:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma_{\log} \sigma_{ric}^2 \sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \frac{1}{z} \exp\left[-\frac{(\ln z - \mu)^2}{2\sigma_{\log}^2} - \frac{r^2 + Z^2}{2\sigma_{ric}^2}\right] \cdot I_0\left(\frac{rZ}{\sigma_{ric}^2}\right) dz \quad (3)$$

其中, σ_{ric}^2 、 $\sigma_{\log}^2$ 分别为莱斯分布和对数正态分布的方差

全阴影模型可参考 Corazza 模型^[6]进行分析, 其接收信号可表示如下:

$$r(t) = (z(t) + d(t)) \cdot s(t) \quad (4)$$

其中 $z(t)$ 表示直射分量, $d(t)$ 表示纯多径分量, $s(t)$ 表示阴影衰落。定义

$$R(t) = z(t) + d(t) \quad (5)$$

假设 $R(t)$ 的包络 R 服从莱斯分布, $s(t)$ 的包络 s 服从对数正态分布。由于 $R(t)$ 和 $s(t)$ 可认为是相互独立的随机过程, 根据随机过程理论可得接收信号包络 r 的概率密度函数如下:

$$p(r) = \int_0^\infty \frac{1}{s} \cdot p_r\left(\frac{r}{s}\right) p_s(s) ds \quad (6)$$

其中 $p_R()$ 和 $p_s()$ 分别为 R 和 s 的概率密度函数。另外, 假设 $s(t)$ 暂时保持不变, 则由全概率公式可得

$$p(r) = \int_0^\infty p_r(r|s) p_s(s) ds \quad (7)$$

比较公式 6, 7 可得

$$p_r(r|s) = \frac{1}{s} p_R\left(\frac{r}{s}\right) \quad (8)$$

由于 R 服从莱斯分布, 设莱斯分布的方差为 σ_{ric}^2 , 直射分量 $z(t)$ 的幅值为 z , 则

$$p_R\left(\frac{r}{s}\right) = \frac{r}{s\sigma_{ric}^2} \exp\left\{-\frac{r^2 + s^2 z^2}{2\sigma_{ric}^2 s^2}\right\} I_0\left(\frac{rz}{s\sigma_{ric}^2}\right) \quad (9)$$

结合公式 8 可得

$$p_r(r|s) = \frac{1}{s} p_R\left(\frac{r}{s}\right) = \frac{r}{s^2 \sigma_{ric}^2} \exp\left\{-\frac{r^2 + s^2 z^2}{2\sigma_{ric}^2 s^2}\right\} I_0\left(\frac{rz}{s\sigma_{ric}^2}\right) \quad (10)$$

又因 s 服从对数正态分布, 设 $\sigma_{\log}^2$ 为对数正态分布的方差, 则

$$p(s) = \frac{1}{s\sigma_{\log}\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\ln s - \mu)^2}{2\sigma_{\log}^2}\right\} \quad (11)$$

结合对数正态分布的概率密度函数可得

$$\begin{aligned} p(r) &= \int_0^\infty p_r(r|s) p_s(s) ds \\ &= \int_0^\infty \frac{r}{\sqrt{2\pi} \cdot s^3 \sigma_{\log} \sigma_{ric}^2} \cdot \exp\left\{-\frac{(\ln s - \mu)^2}{2\sigma_{\log}^2} - \frac{r^2}{2\sigma_{ric}^2 s^2} - \frac{z^2}{2\sigma_{ric}^2}\right\} I_0\left(\frac{rz}{s\sigma_{ric}^2}\right) ds \end{aligned} \quad (12)$$

5 结束语

本文结合高速临近空间飞行器的特点以及通信所处的环境, 建立了高速临近空间飞行器之间、高速临近空间飞行器与卫星以及高速临近空间飞行器与地面的通信信道预测模型。在尚未有实测数据的情况下, 利用本章的预测模型可对高速临近空间飞行器通信技术的发展提供有效借鉴。

致谢

在本文的研究过程中, 我的导师赵洪利教授给予了我精心的指导, 同时我的师兄杨海涛、何宇也给我的研究提供了宝贵的建议, 最后感谢我的亲人, 他们的支持和关心是我不断前进的动力。最后, 谨向所有关心、帮助和支持过我的人表示衷心的感谢!

References (参考文献)

- [1] Ji Yan.. Development of Near Space Vehicle[J]. international aviation, 2006, 9: 84~85.
季艳. 国外临近空间飞行器技术发展概述[J]. 国际航空杂志, 2006, 9: 84~85.
- [2] YANG Yazheng, Li Songnian, Yang Jialing. Key Technology Introduction of Hypersonic Vehicle[J]. Advanced in mechanics, 2007, 4(37): 537-550.
杨亚政, 李松年, 杨嘉陵. 高超音速飞行器及其关键技术简论[J]. 力学进展, 2007, 4(37): 537-550.
- [3] ZENG Ming, LIU Jun, QU Zhangua. Numerical Study of Electron Density in the Plasma Sheath over the Capsule[J]. journal of national university of defence technology, 2001, 1(23): 19-22.
曾明, 柳军, 瞿章华. 载人飞船等离子体鞘电子密度分布的数值计算[J]. 国防科技大学学报, 2001, 1(23): 19-22.
- [4] LEI Yanhua, XU Min, CHEN Shilu. The Aerothermal Calculation of Hypersonic Vehicle[J]. aerospace shanghai, 2001, 5: 10-13.
雷延花, 徐敏, 陈士鲁. 高超音速飞行器气动加热计算[J]. 上海航天, 2001, 5: 10-13.
- [5] YANG Hongwei, HE Chen, ZHU Hongwen, SONG wentao. Statistical Model for the Fading Channel of the Stratospheric Communication[J]. JOURNAL OF SHANGHAI JIAOTONG UNIVERSITY, 2002, 3(26): 331-336.
杨红卫, 何晨, 褚鸿文, 宋文涛. 平流层通信衰落信道的统计模型[J]. 上海交通大学学报, 2002, 3(26): 331-336.
- [6] G.E. Corazza, F. Vatalaro. A Statistical Model for Land Mobile Satellite Channels and Its Application to Nongeostationary Orbit Systems[C]. IEEE Trans. on VT. Aug. 1994, 43: 738~742.