

高速飞行器非视距短波通信的可行性验证飞行试验*

孙 斌¹, 谢 楷¹, 权 磊¹, 詹劲松², 刘 艳¹, 张毓瑾¹

(1 西安电子科技大学空间科学与技术学院 西安 710126

2 西安电子科技大学机电工程学院 西安 710071)

摘要: 当高速飞行器处于失稳失控等紧急情况时, 现有航天器测控方法可能面临地面站天线无法及时跟踪和对准飞行器的问题, 这将导致测控通信链路的中断, 无法传输紧急的安控遥控指令。为了在飞行器失稳失控、非视距通信时与地面站维持通信, 提出将短波通信应用于高速飞行器测控通信系统的应急通信, 并进行非视距短波通信的飞行试验以验证方法的可行性。在试验中, 地面站发射 7 MHz 的短波信号, 高速飞行器内部安装的交流磁场计用于接收短波信号, 获得了短波的磁场强度与飞行环境的本底噪声。试验结果表明, 随着飞行器海拔的增加, 磁场强度减小, 高速飞行器始终能在非视距和天线不对准的情况下接收到短波信号, 证实了短波应用于高速飞行器应急通信的可行性。试验是进一步验证高速飞行器在远距离、超视距以及拒止环境下应急通信的技术基础, 同时, 也为高速飞行器短波通信系统的研制提供重要的数据支撑。

关键词: 非视距短波通信; 高速飞行器; 飞行试验; 应急通信; 安控系统

中图分类号: V44; E962 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)03-0033-06

Flight experimental investigation on shortwave communication of high-speed vehicles under non-line-of-sight propagation

SUN Bin¹, XIE Kai¹, QUAN Lei¹, ZHAN Jingsong², LIU Yan¹, ZHANG Yujin¹

(1. School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710126, China;

2. School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: When a high-speed vehicle (HSV) is under emergencies such as instability, out of control, etc., a space TT&C system may face the problem that TT&C antennas in ground stations cannot continuously track and align the HSV, which causes the interruption of TT&C communication links and finally fails to transmit safety-control command and telecommand. In order to maintain TT&C communication links with ground stations when a HSV is instability, out of control, and non-line-of-sight (NLOS) propagation, it is proposed to apply shortwave communications to HSV TT&C system as an emergency communication method. Therefore, a flight experiment of NLOS shortwave propagation was conducted on a HSV. In the experiment, a ground station emits shortwave at 7 MHz, and the shortwave signal is received by a magnetic field meter that is installed inside the HSV. The magnetic field intensity of the received shortwave and background noise in flight environment are obtained. The experimental results show that as the altitude of the HSV increases, the magnetic field intensity decreases, and the HSV can always receive the shortwave signal in the case of NLOS and of antenna misalignment, which experimentally verified the viability of this method. This is the technical base of maintaining communications of HSV in long distance, beyond the horizon, and denied environments, and also provides important data to develop shortwave emergency communication systems for HSVs.

Key words: NLOS shortwave communications; High-speed vehicles; Flight experiment; Emergency communications; Safety-control systems

引 言

在高速飞行器飞行过程中, 飞行器测控信息通过测控系统下发至地基测控站, 为地面站提供实时的飞行状态; 当高速飞行器姿态需要调整时, 地面站发送控制指令, 控制飞行器姿态^[1-3]。国内航天测控主

*基金项目: 国家自然科学基金 (61771370, 61701367, 11704296, 61871302); 国家自然科学基金青年项目 (61806143)

收稿日期: 2021-02-01 收修改稿日期: 2021-03-19

要采用地基测控, 其工作频段通常高于 30 MHz (P 波段), 主要传播模式为视距 LoS (Line of Sight) 传播^[3]。地基测控站与高速飞行器之间的有效通信受到地面站天线对准、视距、工作仰角等因素的限制。当高速飞行器的航程超过数百公里时, 以至于超过视距传播的有效距离, 需要多个地面站协同跟踪从而完成全弧段的测控任务。

在飞行全程中, 地面站需要实时跟踪飞行器, 建立并保持与飞行器之间的有效通信链路^[4]。而且, 高速飞行器需要布置多个天线窗口, 在机身姿态调整时保证至少一个天线对准地面站^[2]。然而, 在紧急场景下, 如高速飞行器处于非视距情况、大机动区、姿态异常、甚至失稳失控时, 飞行器可能不在地面站天线覆盖区域, 或者飞行器天线与地面站不对准, 这将造成地面站跟踪与测控失败, 飞行器无法接收地面站发射的安控指令和紧急遥控指令^[5,6]。

短波作为应急通信的主要方法, 在现代航空器通信系统得到广泛应用, 验证了其非视距和超视距的通信能力^[7-9], 而且短波具有强绕射能力、长距离传播、低大气衰减等优点。高速飞行器的尺寸远小于短波频段波长, 短波能够在飞行器周围形成绕射, 因此当高速飞行器姿态异常时, 飞行器上仍有可能接收短波信号; 依靠于天波传播模式, 短波能够建立超视距通信链路。鉴于上述原因, 我们提出将短波通信应用于高速飞行器作为其应急通信手段, 在高速飞行器姿态异常时维持通信链路不中断。但是由于短波天线的尺寸与其 1/4 波长相近, 现有短波天线必须安装于航空器的机身、机翼等大空间的平台结构^[10,11]。这种短波天线并不适用于高速飞行器, 因为凸出飞行器外表面的短波天线破坏高速飞行器气动特性, 甚至被高速飞行器的气动热烧毁^[12,13], 因此短波天线只能安装于高速飞行器的舱体内部。近些年随着磁场传感检测技术向小型灵巧化发展, 小型交流磁场计能方便地安装于高速飞行器狭小的舱体内部以检测短波信号, 其尺寸可低于 1/100 波长^[14]。

本文提出把短波通信应用于高速飞行器测控通信系统的应急通信, 实现在高速飞行器失稳失控、非视距通信时与地面站维持通信不中断。其思路是在高速飞行器内部安装小型交流磁场计接收短波信号。当飞行器的姿态任意调整时, 短波在飞行器周围形成绕射, 交流磁场计将始终在飞行器内部接收短波信号。为了验证短波频段用于高速飞行器应急通信的可行性, 本文展示了一次非视距短波通信试验。该试验中接收短波信号的交流磁场计被飞行器金属机体遮挡, 地面站不对准飞行器, 短波以非视距传播模式达到飞行器。在高速飞行器的飞行过程中, 接收短波的磁场分量和地-空链路中本底噪声被记录。利用短波的超视距传播能力以及在飞行器周围的绕射能力, 该方法能够有效地实现超视距远距离下的高速飞行器测控通信, 同时避免了高速飞行器上布置多个天线窗口, 减小开窗数量降低对飞行器气动特性的影响。

1 高速飞行器接收的短波传播模型

当地面发射短波信号, 高速飞行器接收短波信号时, 假设高速飞行器处于发射天线的仰角范围内, 通信链路可以简化为点对点通信链路, 如图 1 所示。

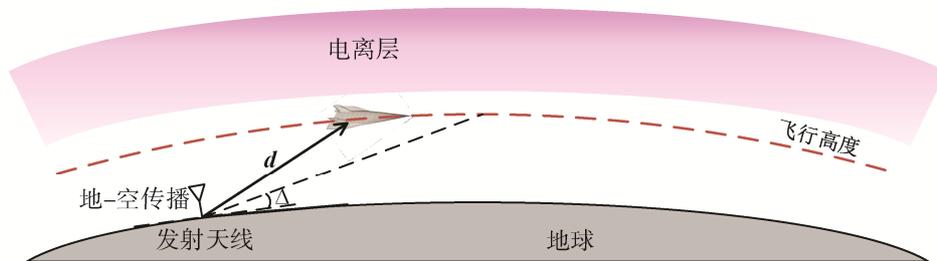


图 1 高速飞行器接收的短波传播示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shortwave propagation under a high-speed aircraft reception
根据 ITU P.525 建议书, 在高速飞行器处电场强度 E_R 为

$$E_R = 137.2 + 10 \lg(P_T) + G_T + 20 \lg(f) - L_{bf} \quad (\text{dB}\mu\text{V/m}) \quad (1)$$

其中, P_T 为发射机功率 (单位: kW), f 为短波频率 (单位: MHz), G_T 为发射天线增益 (单位: dB),

L_{bf} 是考虑传播路径上的基本传输损耗（单位：dB），由（2）式表示

$$L_{bf} = 32.45 + 20\lg(f) + 20\lg(d) \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

其中， d 是有效传播距离（单位：km）。高速飞行器接收的短波磁场强度等于其电场强度除以波阻抗，即 $H_R = E_R / Z_0$ ，其中 $Z_0 = 120\pi$ 是真空波阻抗（单位： Ω ），则磁场强度用 dB 表示为式（3）。

$$H_R = E_R - 20\lg(Z_0) \quad (\text{dB}\mu\text{A/m}) \quad (3)$$

假设地面发射站的发射功率为 $P_T = 0.1 \text{ kW}$ ，采用 $G_T = 0 \text{ dB}$ 的全向天线，高速飞行器的飞行高度为 80 km，射程为 100 km。根据式（1）~式（3）可得，电场强度为 $E_R = 0.62 \text{ mV/m}$ ，磁场强度为 $H_R = 2.05 \mu\text{A/m}$ ，磁感应强度为 $B_R = \mu_0 \cdot H_R = 2.58 \times 10^{-12} \text{ T}$ （特斯拉）。当飞行器射程为 100 km 以内时，要求交流磁场计的灵敏度达到 10^{-12} T 数量级才能在高速飞行器的飞行全弧段接收短波信号^[14]。

2 非视距短波通信试验

为了验证短波用于高速飞行器测控通信的可行性，我们开展了一次非视距短波通信试验，其原理如图 2 所示。该试验中高速飞行器内部安装小型的交流磁场计，用于接收短波的磁场分量。地面短波发射站向空中辐射短波，发射站不对准飞行器。发射站与交流磁场计之间的视距被金属的飞行器遮挡，从而建立非视距短波通信链路。在飞行阶段，交流磁场计始终在非视距传播下接收短波。在试验中我们用周期为 1 秒、占空比为 80% 的方波以调幅方式调制 7 MHz 的载波信号，调制深度为 100%，使得发射系统呈现启停状态。当方波是高电平时，试验数据代表磁场强度；当方波是低电平时，试验数据代表飞行环境中的本底噪声。

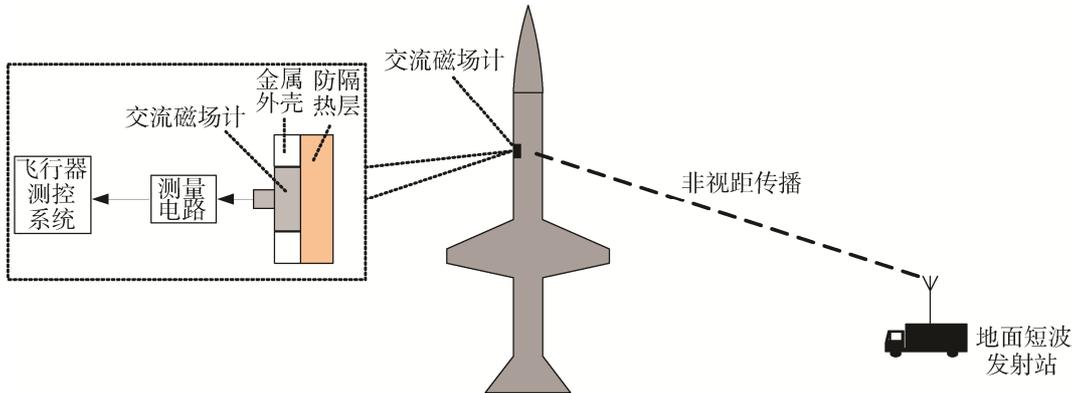


图 2 非视距短波通信试验原理

Fig. 2 Experimental principle of non-line-of-sight shortwave propagation

非视距短波通信试验由飞行器系统、地面短波发射站、交流磁场计共同实现。飞行器系统提供试验所需的一定高度、射程、速度、时间的飞行状态，同时为交流磁场计提供安装空间。地面短波发射站向空中辐射短波，短波的功率、频率、调制方式可设置。交流磁场计在高速飞行器内部接收短波信号，获得磁场分量的振幅和本底噪声。

2.1 地面短波发射站

地面短波发射站系统原理如图 3（a）所示。信号源产生已调制的短波信号，载波频率为 7 MHz，已调短波信号依次通过 100 W 的功率放大器、功率测量表、天线调谐器，由短波发射天线向空中辐射短波。

地面短波发射站距离高速飞行器约 1 km，发射天线采用倒 V 形架设的半波振子偶极天线，振子夹角为 140°，高度为 3 m。经过天线调谐后，在 7 MHz 频率处，短波发射天线的驻波比低于 1.5。天线驻波比、天线架设实物图，如图 3（b）~图 3（c）所示。

2.2 交流磁场计

交流磁场计搭载于高速飞行器的舱体内部，交流磁场计包括 X/Y 路的线圈和测量电路，如图 4 所示。X 路线圈感应垂直于地面方向的磁场分量，Y 路线圈感应平行于地面方向的磁场分量，X 路和 Y 路线圈的方向是正交的。由于磁场分量是矢量，因此通过矢量相加 X 路线圈的信号与 Y 路线圈信号，获得合

成后的磁场强度, 两路线圈等效为一个全向的短波接收天线。根据法拉第电磁感应定律, 时谐的短波信号激励两路线圈产生感应信号。利用硬件电路实现测量、矢量相加, 并把感应信号的幅度转为 0~5 V 的直流信号, 最后通过 ADC 采样发送给飞行器的测控系统。

为此我们校正了交流磁场计的输出直流电压与周围磁场强度, 获得了不同磁场强度下对应的输出直流电压的曲线, 如图 5 所示。磁场检测灵敏度达到了 $0.2 \mu\text{A}/\text{m}$, 超过理论所需性能, 随着磁场强度在 $1 \mu\text{A}/\text{m} \sim 100 \mu\text{A}/\text{m}$ 的范围内增加, 输出直流电压基本呈线性增加, X 路与 Y 路具有较好的一致性, 这表明 X 路与 Y 路对磁场分量敏感度基本一致, 验证了其全向接收能力。测量系统的输出直流电压被飞行器测控系统采样存储, 实时发至地面站。基于磁场强度与输出电压的关系, 根据测量电压能够获得磁场强度 H_R 。

3 试验结果及讨论

非视距短波通信试验获得了短波磁场强度 H_R 与地-空链路中的本底噪声 $Noise_{RMS}$, 如图 6 所示。试验数据表明, 在地面站不对准飞行器的非视距短波通信场景下, 交流磁场计始终能在高速飞行器内部接收短波信号。当飞行器距离地面发射站最远时, 飞行速度约为 $500 \text{ m}/\text{s}$, 飞行高度约为 10 km , 接收的磁场强度最低, 为 $3.10 \mu\text{A}/\text{m}$, 此时本底噪声振幅为 $0.17 \mu\text{A}/\text{m}$, 信噪比 SNR (Signal-to-Noise Ratio) 为 25.22 dB , 这为更远距离下短波频段应急通信系统设计提供数据支撑。试验结果验证了短波频段应用于高速飞行器应急通信的可行性, 也验证了在天线不对准与非视距传播时可维持接收链路不中断。

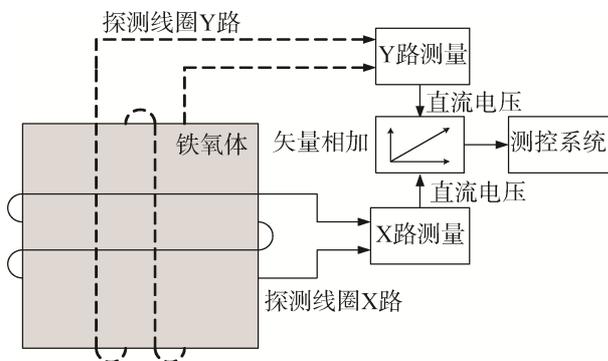
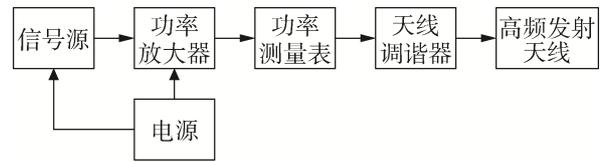
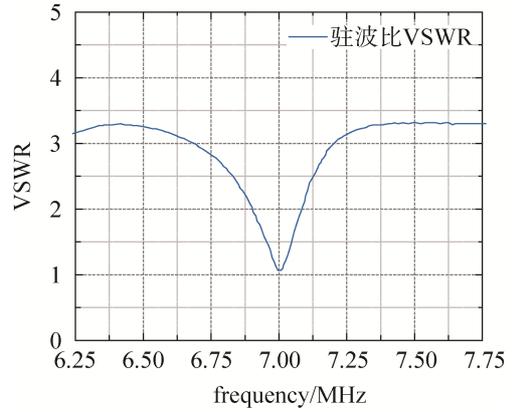


图 4 交流磁场计原理图
Fig. 4 Schematic diagram of the AC magnetic field meter



(a) 原理图
(a) Schematic diagram



(b) 发射天线驻波比
(b) VSWR of the transmitted antenna



(c) 实物图
(c) Photograph

图 3 地面短波发射站

Fig. 3 Ground station for transmitting shortwave

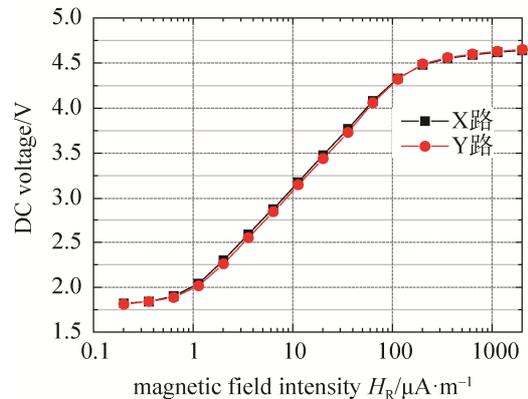


图 5 磁场强度 H_R 与 X 路 Y 路直流电压的关系
Fig. 5 Magnetic field intensity of shortwave H_R vs the DC voltage from X/Y channel

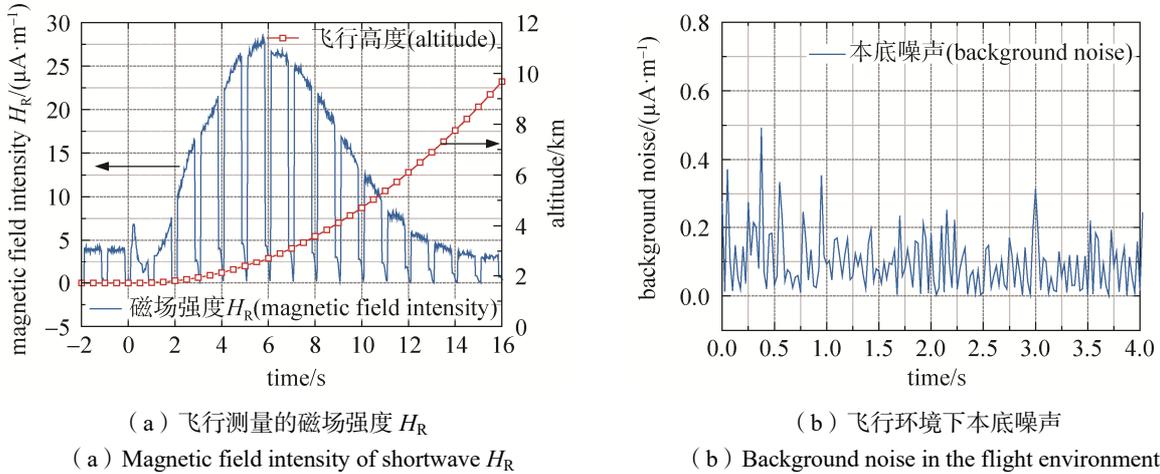


图6 试验结果

Fig. 6 Experimental results

假设短波通信系统的误码率为 10^{-3} ，通信体制采用 QPSK 相位调制，理论信噪比门限为 6.8 dB^[16]，根据式 (1)~式 (3) 可以推算搭载于高速飞行器的短波通信系统在非视距情况下的最大通信距离。从试验结果可以得出 10 km 处的信噪比 $SNR_0=25.22$ dB，QPSK 在 10^{-3} 误码率下信噪比门限 $SNR_1=6.8$ dB，在最远距离时造成信号强度衰减 $\Delta SNR=SNR_0-SNR_1=18.42$ dB，根据式 (1)~式 (3) 得到通信距离增大至 83.4 km。为了进一步提高通信距离以及通信性能，在后续的研究工作中需要提高交流磁场计的灵敏度与发射功率。

在图 6 (a) 中，随着高速飞行器起飞并逐渐远离地面短波发射站，接收的磁场强度在 0~6 s 之间逐渐增大，在 6 s~15 s 之间逐渐减小。根据磁场强度的试验结果，地-空链路飞行环境下的本底噪声被提取，如图 6 (b) 所示。图 6 (b) 表明本底噪声低于 0.5 $\mu A/m$ ，本底噪声的有效值为 $Noise_{RMS}=0.128$ $\mu A/m$ 。接收的磁场强度增大是由于发射天线的方向性导致，磁场强度减小是由于飞行器与地面短波发射站距离增大导致。发射天线的垂直面方向图与飞行路径如图 7 所示，在 0~6 s 的发射过程中，飞行器从地表起飞升高至高海拔区域，起飞前飞行器位于发射天线的低辐射区域，此时飞行器上接收信号的强度较低；随着飞行高度的增加，飞行器逐渐向发射天线的强辐射区域靠近，此时飞行器上接收信号的强度逐渐增高。因此，我们预测在起飞时信号强度呈现逐渐增大趋势应该是发射天线方向性造成。

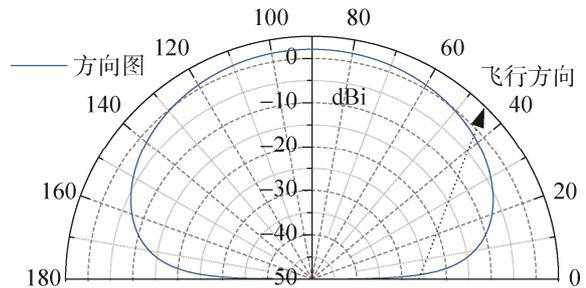


图7 发射天线方向图与飞行方向的关系

Fig. 7 Directivity diagram of the transmitted antenna and the direction of flight

4 结束语

为了在高速飞行器飞行失稳失控时仍维持与地面站测控通信不中断，本文提出将短波应用于高速飞行器测控系统，作为一种高速飞行器的应急通信方法。在非视距传播与地面发射天线不对准情况下，我们开展了一次非视距短波通信试验。试验结果表明，随着飞行海拔的增加，高速飞行器接收的短波磁场强度在降低。当高速飞行器距离地面发射站最远时，磁场强度最低为 3.10 $\mu A/m$ ，本底噪声的有效值为 0.13 $\mu A/m$ 。试验结果验证了短波应用于高速飞行器测控系统的应急通信的可行性，依赖于短波的强绕射能力实现了在高速飞行器非视距传播时维持通信链路不中断。后续研究过程中，我们将依靠短波频段的强绕射和电离层反射的天波传播特点，进一步利用短波建立在超视距传播和低仰角情况下的高速飞行器的测控通信链路，提出适应高速飞行器地-空链路的短波频段的调制方式和通信系统。

参考文献

- [1] 夏南银, 张守信, 穆鸿飞. 航天测控系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
XIA Nanyin, ZHANG Shouxin, MU Honfei. Space TT&C System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [2] 宫长辉, 张颖, 宋屹旻, 等. 运载火箭飞行测控中的链路可见性分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2019, 4: 124–126.
GONG Changhui, ZHANG Ying, SONG Yimin, et al. Link visibility analysis in flight telemetry track and command of launch vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2019, 4: 124–126.
- [3] 王冬冬, 刘德喜, 王莉莉, 等. 航天器测控频段应用现状与展望[J]. 遥测遥控, 2016, 37(6): 45–53.
WANG Dongdong, LIU Dexi, WANG Lili, et al. The current application status and development of TT&C frequency band for spacecraft[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2016, 37(6): 45–53.
- [4] 吴海洲, 王鹏毅, 郭肃雨. 航天测控系统高动态目标角捕获方法研究[J]. 载人航天, 2010, 16(4): 42–45.
WU Haizhou, WANG Pengyi, GUO Suli. Study on angle acquisition method of high dynamic target in space TT&C systems[J]. Manned Spaceflight, 2010, 16(4): 42–45.
- [5] 李赛. 飞行器安控系统地面信息发射技术研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2019.
LI Sai. Research on ground information launch technology of aircraft safety control system[D]. Beijing: North China University of Technology, 2019.
- [6] 岳欣. 飞行器安控系统空中信息接收技术研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2019.
YUE Xin. Research on aerial information receiving technology of aircraft safety control system[D]. Beijing: North China University of Technology, 2019.
- [7] WANG C, CHEN Y, YANG S. Application of characteristic mode theory in HF band aircraft-integrated multiantenna system designs[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(1): 513–521.
- [8] MATTIONI L, MARROCCO G. Design of a broadband HF antenna for multimode naval communications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2005, 4: 179–182.
- [9] HAN D H, POLYCARPOU A C, BALANIS C A. Ground effects for VHF/HF antennas on helicopter airframes[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49(3): 402–412.
- [10] KUBINA S J, TRUEMAN C W, GAUDINE D, et al. Modeling multiple HF antennas on the C-130/Hercules aircraft - part II[J]. IEEE/ACES International Conference on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics, 2005: 144–147.
- [11] AMBURGEY C, PERALA R, RIGDEN G, et al. Determining efficiency of HF aircraft-coupled antennas in composite aircraft using FDTD[J]. Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, 2012: 1–2.
- [12] KNOTT P, LOECKER C, ALGERMISSEN S, et al. Vibration control and structure Integration of antennas on aircraft research in NATO SET-131[J]. 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2013: 2726–2729.
- [13] WANG C, et al. Coupling model and electronic compensation of Antenna-Radome system for hypersonic vehicle with effect of high-temperature ablation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3): 2340–2355.
- [14] 张卫东, 邓胜礼, 郭浩, 等. 基于微波调制参数优化机理的磁强计灵敏度提高方法[J]. 微纳电子技术, 2020, 57(9): 735–740.
ZHANG Weidong, DENG Shenli, GUO Hao, et al. Method for improving sensitivity of magnetometer based on microwave modulation parameter optimization mechanism[J]. Micronanoelectronic Technology, 2020, 57(9): 735–740.
- [15] Recommendation ITU-R P. 525. Calculation of free-space attenuation[S]. Geneva: ITU, 2016.
- [16] PROAKI J G, SALEHI M. Digital Communications, 5th Edition[M]. New York: McGraw-Hill, 2008.

[作者简介]

孙 斌 1994 年生, 博士, 主要研究方向为临近空间飞行器测控通信技术。

谢 楷 1983 年生, 博士, 教授, 主要研究方向为临近空间飞行器测控通信技术。

权 磊 1989 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为压缩感知技术、舱内无线通信技术。

詹劲松 1980 年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为微波射频电路系统设计与测试。

刘 艳 1984 年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为电磁超材料、复杂介质下电波传播理论。

张毓瑾 1998 年生, 硕士, 主要研究方向为临近空间飞行器测控通信技术。