

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.04.017

高速飞行器等离子鞘套的自适应天线匹配系统设计

秦 旭^{1,2}

(1. 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院 桂林 541004; 2. 桂林广播电视发射台 桂林 541002)

摘要:为解决高速飞行器表面产生的等离子鞘套对天线造成失配和驻波比劣化的影响,提出了自适应天线匹配的设计方案。通过使用微带定向耦合器实时测量受到等离子鞘套影响的失配天线,系统可根据失配天线的阻抗数值调整天线端口处的Pi型匹配网络参数,以实现天线阻抗的重新匹配。其中Pi型匹配网络的设计没有采用传统的电感方式,而是改用插入损耗小的1/4波长线加变容二极管方式实现,整个系统以S波段为设计频率,实测系统的总插入损耗为0.63 dB。通过实验测试表明,该系统能将失配驻波为10的天线重新调配到驻波1.5以内。

关键词: 等离子鞘套;阻抗测量;匹配网络;变容二极管;自适应天线

中图分类号: TN827 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Design of adaptive matching antenna for plasma sheath in high-speed aircraft

Qin Xu^{1,2}

(1. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
2. Guilin Broadcast & TV Station, Guilin 541002, China)

Abstract: In order to solve the mismatch and the high standing wave in antenna are influenced by the plasma sheath in the surface of high speed aircraft, an adaptive antenna matching design is proposed. The mismatch antenna with plasma sheath effect was real-time measured by the micro-strip line directional coupler, the Pi type impedance matching network embedded in antenna was performed according to the impedance value of the mismatch antenna, eventual matching of antenna was achieved. The design was not used the inductive component in the Pi type matching network, but instead of a 1/4 wavelength transmission line with low loss varactor. The entire system was designed in S band frequency, the insertion loss of entire system was 0.63 dB by experimental measured. The experimental results show that the system can reconfigure the standing wave of the mismatch antenna from 10 to 1.5.

Keywords: plasma sheath; impedance measure; matching network; varactor; adaptive antenna

1 引 言

高速航天飞行器在返回大气层时或以10马赫以上的高速飞行器在近高空飞行时,由于其外壳体与空气发生剧烈的摩擦加热和激波挤压,高速飞行器的表面温度可高达3 000 K以上,并对其周围空气分子产生一系列的电离反应形成等离子体,这些等离子体在飞行器的外表面周围形成一个鞘套,称之为等离子鞘套^[1-3]。研究发

现,电磁波在穿透等离子鞘套后其能量会被大量的吸收,造成严重的吸收衰减,同时由于等离子鞘套与空气的介电常数不同,等离子鞘套也将对电磁波产生反射。正是由于高速飞行器表面等离子鞘套的出现使得飞行器上的电磁天线受到严重的干扰,最严重的情况下可以使得飞行器上的所有电磁信号完全屏蔽于等离子鞘套内无法与外界进行通信,即通常所说的黑障现象^[4-5],该现象的出现给高速飞行器的实时通信和测控带来极大的危害。

目前国内外学者在研究等离子鞘套时除了关注其对电磁波的吸收外也注意到其对飞行器上天线性能的影响^[6-7],由于通常飞行器上的天线性能指标都是在发射前做静态测试,而在飞行器表面产生等离子鞘套后,等离子体对电磁波的反射将使得天线的性能严重失配(具体表现为天线阻抗的变化),而且这一失配过程会随着等离子鞘套产生的厚薄不同而变化,为了解决飞行器上天线的失配问题,本文设计了一种自适应天线匹配系统对时变的失配天线阻抗进行实时的自动补偿,以保证飞行器上的天线发射、接收功率为最佳。

2 自适应天线匹配总体方案

自适应天线匹配如图1所示,主要有3部分组成,即天线阻抗测量模块、处理器模块和天线匹配网络。系统的工作原理是,首先天线阻抗测量模块实时的测量天线的阻抗变化情况,并将测量得到的入射电压、反射电压分别发送给处理器模块,由处理器实时计算出天线矢量阻抗数值和电压驻波 VSWR,当发现天线的 VSWR 变恶劣后,处理器会根据天线阻抗数值对天线匹配网络进行相应的调整,通过系统内部的阻抗匹配算法使得失配的天线重新调整到最佳匹配状态。

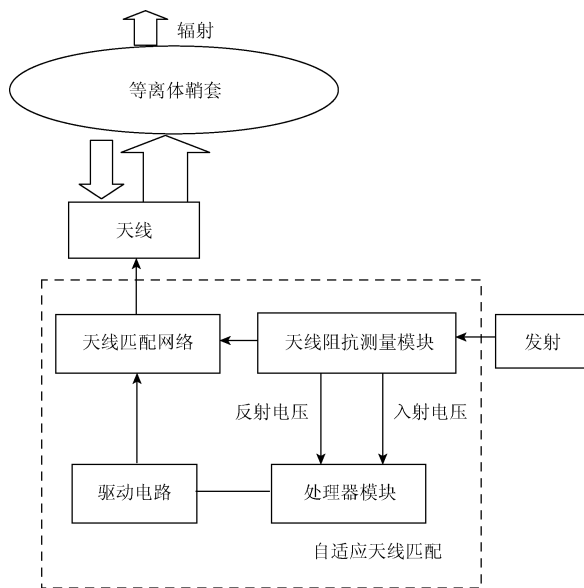


图1 自适应天线匹配系统

Fig. 1 Block diagram of adaptive matching antenna

根据不同的工作频率段,系统中的天线匹配网络和天线阻抗测量模块结构将有所不同,但由于设计中采用微带电路的方式,因此只需要修改微带电路的对应尺寸就可以很好的适应不同工作频率,本文是以 S 波段 2.3 GHz 频率进行系统的测试设计。

3 天线阻抗测量模块

在自适应天线匹配系统中,天线阻抗测量模块是一个重要的模块,因为只有精确的测量天线在等离子鞘套下的具体失配情况,即阻抗变化,才能根据失配后测量得到的阻抗数值去调整匹配网络的参数,最后也是通过它来确定调整的匹配网络参数是否使天线与发射之间完全匹配,本系统设计以天线电压驻波 $VSWR < 1.5$ 为天线正常匹配的指标。测量模块的系统框如图2所示。

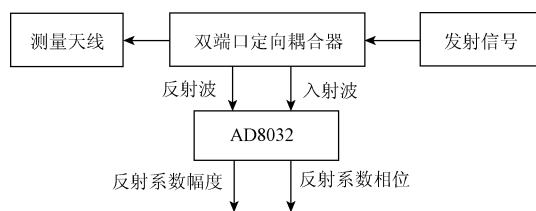


图2 天线阻抗测量模块

Fig. 2 Measurement module of antenna impedance

测量模块的核心是双端口定向耦合器,它将发射信号在天线端口处的入射波和反射波分别提取出来,然后通过 AD8032 芯片实现入射、反射波的幅度和相位的测量,最后在处理器模块内根据反射系数计算出天线的阻抗数值。

3.1 双端口定向耦合器

系统使用的双端口定向耦合器采用平行耦合微带线设计,使用介电常数 $\epsilon_r = 3.38$,厚度 $H = 1$ mm 的微带基板材料,其 AWR 仿真电路如图3所示。

AWR Office 软件对该双端口定向耦合器的仿真 S 参数结果如图4所示。

实际 PCB 制版后,用 Agilent8753ES 矢量网络分析仪对设计的 2.3 GHz 双端口定向耦合器进行了测量,结果如表1所示。

从 S 参数实际测试结果上看,AWR 仿真与实际矢网测试数值是基本一致,该定向耦合器的入射、反射波的耦合度为 20 dB,方向性大于 18 dB,插损插入损耗为 0.4 dB,基本满足天线阻抗测量的要求。

3.2 幅度相位测量

当使用双端口定向耦合器将天线端口的入射波和反射波分别耦合出来后,需要通过测量入射、反射波的相对幅度值和相位得到天线端口的反射系数,系统使用了 Analog Devices 公司的 AD8302 芯片来实现了这一功能。

AD8302 可以精确测量两路独立信号之间的幅度和相位差值,其工作频率最高为 2.5 GHz 满足本系统的设计要求,功能框图如图5所示。

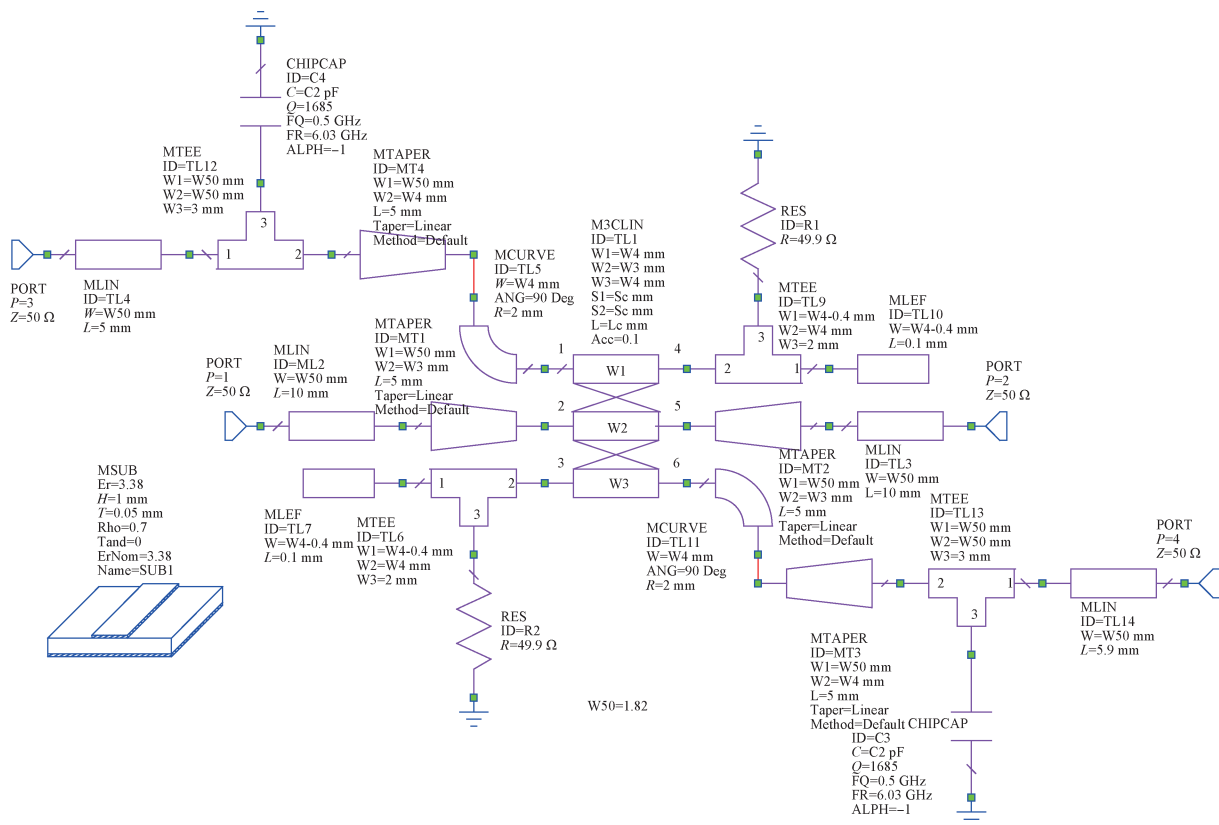


图 3 2.3 GHz 双端口定向耦合器仿真电路

Fig. 3 Simulation circuit of 2.3 GHz dual directional coupler

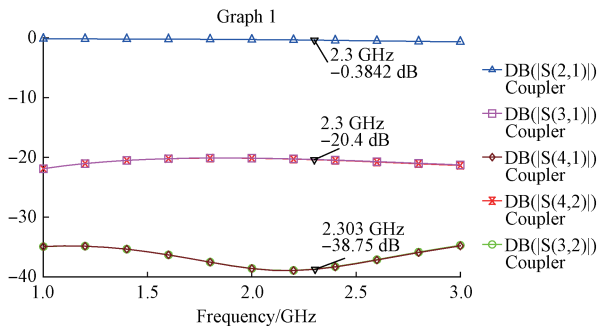


图 4 2.3 GHz 双端口定向耦合器仿真 S 参数结果

Fig. 4 Simulation result of S parameters for 2.3 GHz dual directional coupler

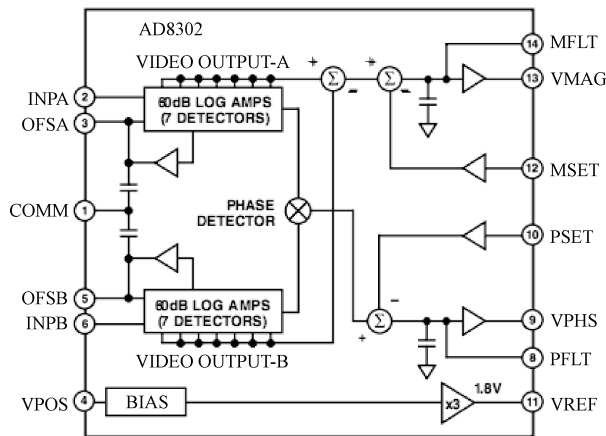


图 5 AD8302 功能框图

Fig. 5 Block diagram of AD8302 function

定向耦合器的入射波信号 V_{INA} 送入 AD8302 的 Pin2 脚 INPA 输入端,反射波信号 V_{INB} 送入 Pin6 脚 INPB 输入端,在 AD8302 内部有两个 60 dB 的对数放大分别对 INPA/INPB 信号放大检波,最后输出一个两路信号的幅度差值 VMAG,同时两路信号也通过一个乘法器滤波后得到 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的相位差值 VPHS,其具体表达为:

$$V_{MAG} = V_{SLP} \times \log(V_{INA}/V_{INB})$$

表 1 2.3 GHz 双端口定向耦合器 S 参数测试

Table 1 Measurement results of S-parameters for 2.3 GHz dual directional coupler (dB)

S 参数	仿真理论值	测试值
S21 插入损耗	0.3842	0.395
S31 入射耦合度	20.40	20.78
S41 入射隔离度	38.75	38.50
S42 反射耦合度	20.40	20.11
S32 反射隔离度	38.75	40.20

$$V_{PHS} = V_{\Phi} [\Phi(V_{INA}) - \Phi(V_{INB})] \quad (1)$$

式中: V_{SLP} 为芯片幅度数值计算的斜率,其常数单位为 30 mV/dB。 V_{Φ} 为芯片相位计算的斜率常数,其单位为 10 mV/(°),式(1)可以用图6所示表述。

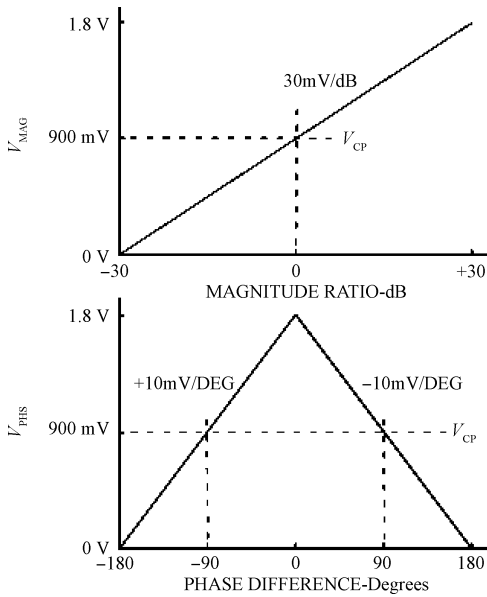


图6 AD8302 芯片的幅度和相位测量传输特性曲线
Fig.6 Curves of amplitude and phase measurement of transfer characteristics for AD8302

由图6可知,AD8302的相位测量值为 $0^{\circ} \sim \pm 180^{\circ}$,因此AD8302无法测量出天线阻抗的虚部符号,即无法分辨出天线阻抗处于容性区或感性区,但这一缺陷不会影响天线的匹配网络的调配,最终系统通过处理器的程序进行优化克服AD8302的相位不完整的问题。

根据AD8302测量出天线端口的入射、反射波的幅度差值 V_{MAG} 和相位差值 V_{PHS} ,可计算出天线阻抗数值、反射系数和电压驻波如下:

$$\begin{cases} \vec{\Gamma} | V_{MAG} | \angle \Phi(V_{PHS}) = | V_{MAG} | \{ \cos(\Phi(V_{PHS})) + j \sin(\Phi(V_{PHS})) \} \\ \vec{Z}_{ANT} = R_{ANT} + jX_{ANT} = Z_0 \frac{1 + \vec{\Gamma}}{1 - \vec{\Gamma}} \\ VSWR = \rho = \frac{1 + | \vec{\Gamma} |}{1 - | \vec{\Gamma} |} \end{cases} \quad (2)$$

4 天线匹配网络

系统在测量出天线的阻抗数值后,根据天线与发射机之间的具体失配情况,使用匹配网络将失配的天线重新调整到最佳匹配状态。

天线匹配网络的拓扑结构主要有三种形式,分别是

Pi型网络、L型网络和T型网络,Pi型网络由于其匹配的范围,设计方便,因此系统的采用的天线匹配网络结构为Pi型网络拓扑结构,如图7所示。

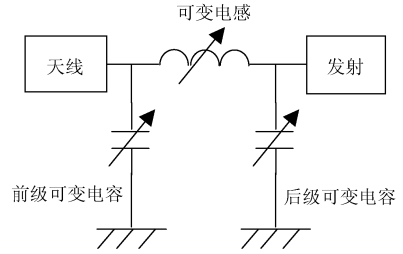


图7 Pi型匹配网络结构

Fig.7 Structure of Pi matching network

本设计中Pi型匹配网络电路由微带电路实现,网络中的可变电容由变容二极管构成,通过调整变容二极管上的反向控制电压就可以控制可变电容的数值,网络中的电感使用1/4波长线进行等效^[8-12],最终通过变容二极管来取代网络中的可变电感,如图8所示。

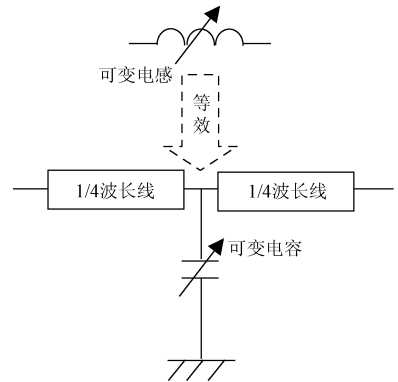


图8 可变电感等效电路

Fig.8 Equivalent circuit of variable inductor

因为射频电感自身的Q值低、损耗大,因此如果使在匹配电路中采用它将引起较大的插入损耗,而且在2.3 GHz频率做一个可变电感工艺上也极其复杂,通过1/4波长变换线将可变电感转换为可变电容的方式即降低了网络的插入损耗,同时也利于控制电路的设计。

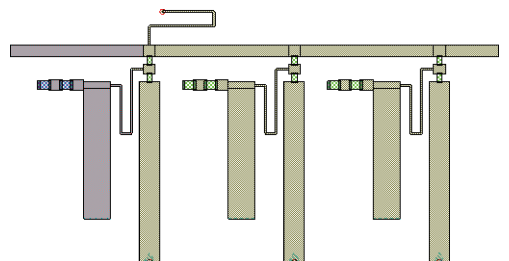


图9 Pi型匹配网络仿真电路

Fig.9 Simulation circuit of Pi matching network

用 AWR Office 对整个 Pi 型匹配网络进行仿真,其电路结构如图 9 所示。该匹配网络的 3 个变容二极管的反向工作电压为 0 ~ 30 V,电容变化范围为 0.5 ~ 20 pF,用此参数对匹配电路的调配能力进行仿真,从仿真数据上分析,设计的 Pi 型匹配电路基本可以覆盖 Smith 图的 90% 以上的区域,结果如图 10 所示。

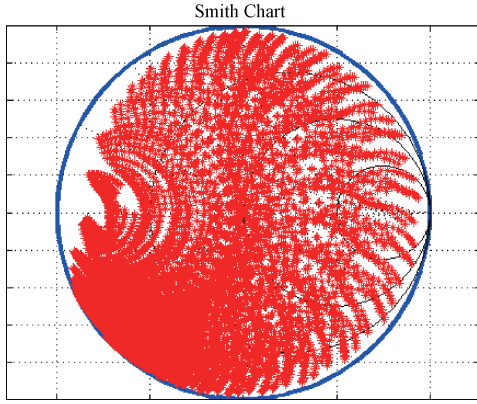


图 10 Pi 型匹配网络的调配能力

Fig. 10 Tuning capable of Pi matching network

5 处理器模块

处理器模块主要有 3 部分组成,如图 11 所示。其工作流程为首先天线阻抗测量模块将天线端口的入射、反射波通过 AD8302 芯片转换为直流的幅度、相位差值送入处理器模块的 16 Bit ADC 采样,CPU 由 ADC 数值计算出天线的阻抗,由于 AD8302 的相位缺陷,程序必须根据微调匹配网络后级可变电容数值来判断天线阻抗在容性或感性区,然后 CPU 再根据天线的阻抗数值计算出匹配网络必须加入的可变电容器数值^[13-15],最终形成天线匹配网络中的变容二极管的调整电压,对于变容二极管的调整电压通过一个 30 V 升电路进行处理。

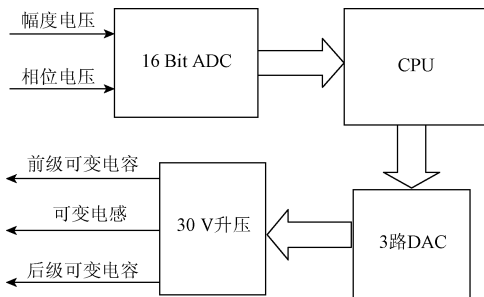


图 11 处理器模块

Fig. 11 Module of processor

6 实际测试与验证

在等离子鞘套条件下天线的失配驻波可以高达 6 以

上^[16],为了测试自适应天线匹配系统对实际失配天线的匹配能力,实验中使用了一个谐振在 2.3 GHz 的微带介质天线,通过在天线辐射体上附着一小片导体使得其偏离设计谐振频率以仿真等离子鞘套对天线的影 响,该天线在 2.3 GHz 频率下失配电压驻波 $VSWR = 10$,再通过不同长度的同轴线将失配天线的阻抗分别调整到 Smith 圆图的 4 个不同象限上以分别验证系统的调配能力范围。实验测试平台如图 12 所示。

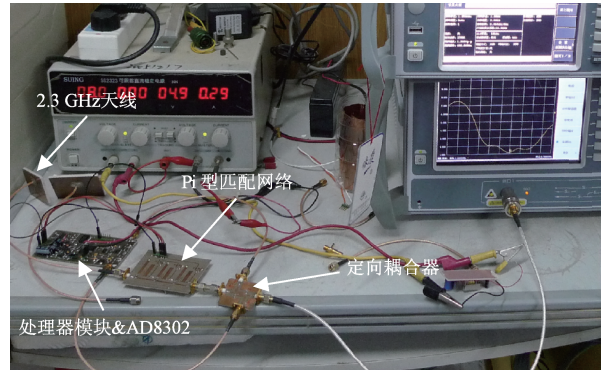


图 12 系统验证平台

Fig. 12 Test platform of system

实验测试平台的 2.3 GHz 信号源由矢量网络分析仪产生,信号电平为 0 dBm,由于 AD8302 芯片的输入电平灵敏度为 0 ~ -60 dBm,动态范围为 60 dB,因此完全可以满足测试的要求。

根据失配微带介质天线在四个不同阻抗象限的失配情况,实验测试平台都可以将失配的天线调整到电压驻波 $VSWR < 1.5$ 的范围,具体实验数据如表 2 所示。

表 2 2.3 GHz 自适应天线匹配数据

Table 2 Matching data for 2.3 GHz adaptive antenna

失配天线象限	失配天线 阻抗	失配 VSWR	调配后 VSWR	调配时间 ms
1(感性低阻区)	5.70 + j24.98	10.98	1.32	4.2
2(感性高阻区)	2.50 + j7.15	9.03	1.45	2.3
3(容性高阻区)	28.06 - j93.44	8.45	1.21	6.4
4(容性低阻区)	6.96 - j17.01	8.03	1.36	1.8

7 结 论

本文根据高速飞行器产生等离子鞘套对天线失配的影响,使用微带电路结构设计了一套自适应天线匹配系统,该系统通过实时精确测量天线的阻抗数值,并根据天线阻抗数值得到天线失配情况,最终通过调整天线端口

处的 Pi 型匹配网络参数达到将失配天线重新匹配的效果,该系统结构合理,响应速度快,调整精度高,经过实验测试平台验证其结果达到预计设想。该系统不仅可以解决高速飞行器的等离子鞘套下的天线失配问题,还可以运用于雷达以及通信等相关领域。

参考文献

- [1] BAI B, LI X, LIU J, et al. Effects of reentry plasma sheath on the polarization properties of obliquely incident EM waves [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 42(10): 3365-3372.
- [2] KIM M, KEIDAR M, BOYD I D, et al. Electrostatic manipulation of a hypersonic plasma layer: Images of the two-dimensional sheath [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(4): 1198-1199.
- [3] 石磊, 郭宝龙, 刘彦明, 等. 临近空间高速飞行器综合信道模型研究 [J]. 宇航学报, 2011, 32(7): 1557-1563.
- SHI L, GUO B L, LIU Y M, et al. Research on integrated channel model for near-space hypersonic vehicle [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(7): 1557-1563.
- [4] LIU J F, XI X L, WANG B, et al. Simulation of electromagnetic wave propagation through plasma sheath using the moving window finite-difference time-domain method [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(3): 852-855.
- [5] 谢楷, 李小平, 杨敏, 等. L, S 频段电磁波在等离子体中衰减实验研究 [J]. 宇航学报, 2013, 34(8): 1166-1171.
- XIE K, LI X P, YANG M, et al. Experimental study on attenuation characteristics of L and S Band electromagnetic wave in plasma [J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(8): 1166-1171.
- [6] 郭润辉, 刘洪艳, 刘佳琪, 等. 等离子体鞘套对 C 波段通信信号传输影响的试验 [J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(11): 1-6.
- WU R H, LIU H Y, LIU J Q, et al. Experiment on influence of the communication signals transmission in plasma sheath [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(11): 1-6.
- [7] 习马平, 曾学军, 石安华, 等. 电磁波在等离子体高温气体中传输特性实验研究 [J]. 实验流体力学, 2010, 24(5): 51-58.
- XI M P, ZENG X J, SHI AN H, et al. Experimental investigation on electromagnetic wave transmission characteristic in the plasma high temperature gas [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2010, 24(5): 51-58.
- [8] FIRRAO E L, ANNEMA A J, FRANK E V, et al. On the minimum number of states for switchable matching networks [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I, 2015, 62(2): 433-440.
- [9] WANG X, GONG S X, GUO G J, et al. Fast and accurate wide-band analysis of antennas mounted on conducting platform using AIM and asymptotic waveform evaluation technique [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(12): 4624-4633.
- [10] DUTTA R S C. Characteristics of single-and multiple frequency impedance matching networks [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems Part II: Express Briefs, 2015, 62(3): 222-225.
- [11] ZAMORAG S, ZUFFANELLI S, PAREDES F, et al. Design and synthesis methodology for UHF-RFID tags based on the t-match network [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(12): 4090-4098.
- [12] 解光军, 顾云海, 夏禹根, 等. 用于 RFID 的自动天线调谐系统的设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(3): 49-53.
- XIE G J, GU Y H, XIA Y G, et al. Design of antenna auto matching system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(3): 49-53.
- [13] TAN Y H, CHEN S H, ZHANG G M, et al. Adaptive impedance matching using quantum genetic algorithm [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(4): 977-981.
- [14] 艾慧, 谭阳红, 何怡刚, 等. 自动调谐系统阻抗匹配网络解析法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(2): 283-290.
- AI H, TAN Y H, HE Y G, et al. Analytical algorithm for impedance matching network of auto-tuning system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2016, 30(2): 283-290.
- [15] 钱玉良, 程健, 刘东宇, 等. 模拟退火算法在自动阻抗匹配器中的应用研究 [J]. 测控技术, 2009, 28(9): 80-83.
- QIAN Y L, CHENG J, LIU D Y, et al. Application of simulated annealing algorithm in automatic impedance matching system [J]. Measurement & Control Technology, 2009, 28(9): 80-83.
- [16] 李伟. 飞行器再入段电磁波传播与天线特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 43-50.
- WEI L. Research on electromagnetic wave propagation and antenna characteristic in spacecraft reentry stage [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 43-50.

作者简介



秦旭, 1995 年于桂林电子科技大学获得学士学位, 2013 桂林电子科技大学获得硕士学位, 现为桂林电子科技大学客座教授, 桂林广播电视发射台高级工程师, 主要研究方向为射频信号处理。

E-mail: ovenqin@sina.com

Qin Xu received B. Sc. and M. Sc. both from Guilin University of Electronic Technology in 1995 and 2013, respectively. Now he is guest professor in Guilin University of Electronic Technology and senior engineer in Guilin Broadcast & TV Station. His main research interest includes RF signal processing.