

电磁波在时变磁化等离子体信道中通信性能的实验研究

薄勇 赵青 罗先刚 范佳 刘颖 刘建卫

Experimental study of the communication performance of electromagnetic wave in time-varying and magnetized plasma channel

Bo Yong Zhao Qing Luo Xian-Gang Fan Jia Liu Ying Liu Jian-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 055201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.055201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.055201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I5>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

五边形截面的 Ag 纳米线局域表面等离子体共振模式

Localized surface plasmon resonance modes in Ag nanowires with pentagonal cross sections

物理学报.2015, 64(24): 245201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.245201>

金纳米颗粒光散射提高 InAs 单量子点荧光提取效率

Extraction efficiency enhancement of single InAs quantum dot emission through light scattering on the Au nanoparticles

物理学报.2015, 64(23): 235201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.235201>

间接驱动内爆靶丸示踪元素 Ar 发射 X 光谱线的理论模拟研究

Simulation of X-ray spectrum of Ar tracer in indirectly driven implosion

物理学报.2015, 64(4): 045201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.045201>

中国联合球形托卡马克氦放电等离子体的碰撞辐射模型及其在谱线比法诊断的应用

A collisional-radiative model for the helium plasma in the sino-United spherical tokamak and its application to the line intensity ratio diagnostic

物理学报.2014, 63(12): 125203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.125203>

高功率微波与等离子体相互作用理论和数值研究

Theoretical and numerical studies on interactions between high-power microwave and plasma

物理学报.2014, 63(9): 095202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.095202>

电磁波在时变磁化等离子体信道中通信性能的实验研究*

薄勇^{1)†} 赵青^{1)‡} 罗先刚²⁾ 范佳¹⁾ 刘颖¹⁾ 刘建卫¹⁾

1)(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

2)(中国科学院光电技术研究所, 微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209)

(2015年11月20日收到; 2015年12月11日收到修改稿)

本文首先利用 5.8 GHz 微波实际测量了辉光放电等离子体源电子密度和碰撞频率随时间的变化规律. 然后搭建实验平台, 测试了多种通信调制体制的信号经过该等离子体源后的误码率, 实验发现二进制相移键控 (BPSK) 调制方式的信号在该时间变化的等离子体信道中通信误码率最小. 最后加入磁场, 实验测试了 L 波段 (1.5 GHz) BPSK 调制信号和 S 波段 (2.5 GHz) 正交相移键控 (QPSK) 信号在该磁化等离子体中的衰减、相移以及眼图和星座图的变化, 通过与非磁化情况下对比发现, 加入磁场后, 信道的通信性能有所改善, 误码率显著降低, 可以有效地缓解时变等离子体引起的幅度和相位上的寄生调制效应.

关键词: 时变信道, 磁化等离子体, 调制体制, 可靠通信

PACS: 52.25.Os, 52.40.Db, 41.20.Jb

DOI: 10.7498/aps.65.055201

1 引言

临近空间飞行器在大气层中以超高速飞行时会产生等离子鞘套, 进而引起通信中断, 使飞行器无法与地面站完成可靠通信, 这种现象被称为“黑障”现象. 如何抑制黑障现象, 减小电磁波经过等离子体鞘套时的能量衰减一直是国内外专家研究的热点. 早在 2000 年, 俄罗斯学者 Petrin^[1] 就研究了电磁波在磁化等离子体中的传播特性, 分别对 2.5 GHz 左旋圆极化波和右旋圆极化波进行分析计算, 得出磁场确实可以有效地减小电磁波通过等离子体的衰减. 2007 年, Korotkevich 等^[2] 提出了拉曼散射法来抑制黑障现象. 2010 年, 美国密歇根大学的 Kim 和华盛顿大学的 Keidar^[3] 研究了电磁波在电场与磁场正交分布的等离子体中的传输特性. 2014 年, Kundrapu 和 Loverich^[4] 建立了

三维飞行器流场模型, 并引入磁场, 得出电磁波能够以等离子体哨声波的形式穿过均匀磁化等离子体鞘层. 2015 年, Kundrapu 和 Loverich^[5] 利用傅里叶变换在频域验证了哨声波的出现, 又发现在 RAMC 飞行器流场中所加的磁场增加时, 哨声波的强度还会变大. 以上文献说明等离子体会引起电磁波能量的衰减, 而加磁场可以有效地减小这种衰减, 但能量的衰减只是引起通信中断的一个因素, 相位的抖动和变化同样会造成通信的失败^[6]. 文献^[6] 发现当再入通信的载波频率大于等离子体振荡频率时, 信号能够穿透等离子体但等离子体鞘套的时变特性所引起的调制效应仍然会导致通信失败, 载波频率要远大于等离子截止频率, 才能减弱时变等离子引起的调制效应的影响. 文献^[7] 从理论和实验研究发现非磁化时变等离子体对电磁波的幅度和相位会产生寄生调制效应, 从而使二进制相移键控 (BPSK) 调制信号星座图和眼图恶化, 误码率升

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2011AA7022016)、国家自然科学基金 (批准号: 11275045) 和四川省科技支撑计划 (批准号: 2013GZ01333) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: boyong_boyong@163.com

‡ 通信作者. E-mail: zhaoq@uestc.edu.cn

高,影响通信质量.然而对于加入磁场后,BPSK调制信号的通信质量和误码率会如何变化,至今未发现文献讨论或提及.本文在总结前人成果的基础上,首先测量了实验用辉光放电等离子体源的电子密度和碰撞频率随时间周期变化的特性;然后研究了多种通信调制体制的电磁信号在该等离子体源中误码率随信噪比的变化,实验发现BPSK调制方式在非磁化的等离子体中的误码率最低;最后重点研究了磁场对BPSK电磁信号的通信质量和误码率的影响,观察了L波段BPSK调制信号和S波段正交相移键控(QPSK)调制信号在磁化等离子体中传输时的衰减、相移、误码率、眼图和星座图,并与非磁化下的各个参数进行对比,结果发现磁场的加入不仅可以减小电磁波能量的衰减,还能抑制由等离子体时变特性带来的相位抖动的幅度,可以较为显著地提高通信质量,降低误码率.

2 等离子体电子密度和碰撞频率时间变化规律的实验测试

等离子体鞘套信道是典型的变参信道,对不同的频率存在不同深度的衰落^[8-10],等离子体的时变特性会造成通信系统的误码率显著增大.根据Appleton方程^[11]得到电磁波在时变的非磁化等离子体中折射率的实部 μ 和虚部 χ 如下式:

$$\mu(t) = \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2(t)}{\omega^2 + \nu^2(t)} \right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2(t)}{\omega^2 + \nu^2(t)} \right)^2 + \frac{\nu^2(t)^2}{\omega^2} \left(\frac{\omega_p^2(t)}{\omega^2 + \nu^2(t)} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2}, \quad (1)$$

$$\chi(t) = \left\{ -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2(t)}{\omega^2 + \nu^2(t)} \right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2(t)}{\omega^2 + \nu^2(t)} \right)^2 + \frac{\nu^2(t)^2}{\omega^2} \left(\frac{\omega_p^2(t)}{\omega^2 + \nu^2(t)} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}, \quad (2)$$

其中 $\nu(t)$ 是电子与中性粒子随时间变化的碰撞频率, $\omega_p(t)$ 为随时间变化的等离子体振荡频率,等离子体中的传播常数为 $k = \alpha + (i/\delta)$,其中 $\alpha = (w/c)\mu$ 趋肤深度 δ 满足 $(1/\delta) = (w/c)\chi$.在等离子体中传输的电磁波强度可以表示为

$$E(z, t) = Re(E_0 e^{j(\omega t - kz)}). \quad (3)$$

电磁波经过等离子体的时变衰减可以表示为

$$\begin{aligned} A(t) &= 10 \log_{10} \left\{ \left(\frac{E(t)}{E_0} \right)^2 \right\} \\ &= 10 \log_{10} \left(e^{-\frac{2d}{\delta(t)}} \right) \\ &= 10 \log_{10} \left(e^{-\frac{2d\omega}{c} \chi(t)} \right) \\ &= f(n_e(t), \nu(t), \omega, d), \end{aligned} \quad (4)$$

$n_e(t)$ 表示时变的电子密度,当电磁波在等离子体中传播一段距离 d 后,相位改变 $\varphi = (w/c)\mu d$,而在自由空间相位改变 $\varphi_f = (2\pi/\lambda)d$,那么由等离子体引入的相移可以写成

$$\begin{aligned} \Delta\varphi(t) &= \varphi - \varphi_f \\ &= \left(\frac{\omega}{c} \mu - \frac{2\pi}{\lambda} \right) d \\ &= g(n_e(t), \nu(t), \omega, d). \end{aligned} \quad (5)$$

从(4)和(5)式可以看出衰减 $A(t)$ 和相移 $\Delta\varphi(t)$ 都是 $n_e(t)$, $\nu(t)$, ω , d 的函数,如果能测出等离子体对电磁波造成的衰减 $A(t)$ 和相移 $\Delta\varphi(t)$,联立上述两个方程,就可以解出时变等离子体的电子密度和碰撞频率.而电磁波经过时变等离子体而产生的时变衰减和相移可以由矢量网络分析仪的时域扫描功能测得.

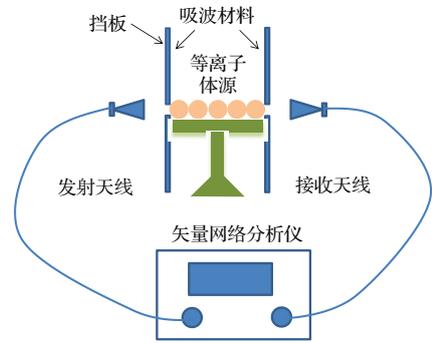


图1 等离子体密度测试平台

Fig. 1. Test platform of plasma density.

图1为测试电磁波经过等离子体后衰减和相移的实验平台^[12],其中发射天线连接到矢量网络分析仪的Port1,接收天线接Port2.测试所用电磁波的频率为5.8 GHz,为防止电磁波绕射,使测试结果更准确,我们在五层等离子体源前后两端加了铝制挡板,并在挡板上贴上一层铁氧体吸波材料.挡板的添加使电磁波只能从放电管的最中间部分通过,一直在等离子体中传播,减小了电磁波绕射和多径效应带来的影响.考虑到电磁波会以小孔为新的波源,波束变宽,为防止电磁波在两挡板间来

回震荡产生驻波, 在挡板的两面贴上一层铁氧体吸波材料, 每经过挡板上的吸波材料反射一次, 电磁波都会有 10 dB 以上的衰减, 尽量保证只有沿水平方向传输的电磁波也就是经过了等离子体层的电磁波可以被接收天线吸收. 另外计算电子密度和碰撞频率的衰减和相移都是真空中的测量值减去有

等离子体时的测量值的差值, 即使有一些电磁波能量绕射被接收天线接收, 也会在做减法时消掉. 由于测试误码率需要一定的时间来统计, 这就要求等离子体源要有持续性, 不宜采用激波管等离子体放电, 实验中并排了 5 根辉光放电等离子体源总厚度 $d = 12.5$ cm.

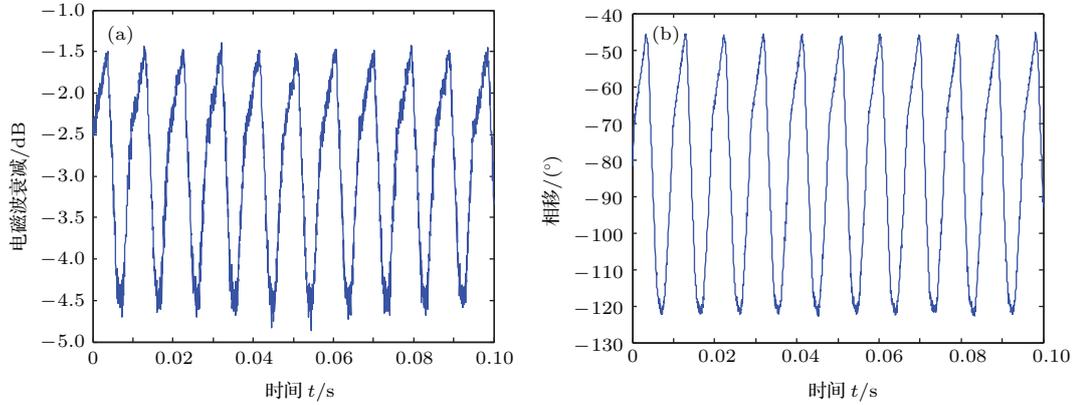


图2 (a) 电磁波衰减随时间的变化曲线; (b) 电磁波相移随时间变化曲线

Fig. 2. (a) The curve of attenuation under different time; (b) the curve of phase shift under different time.

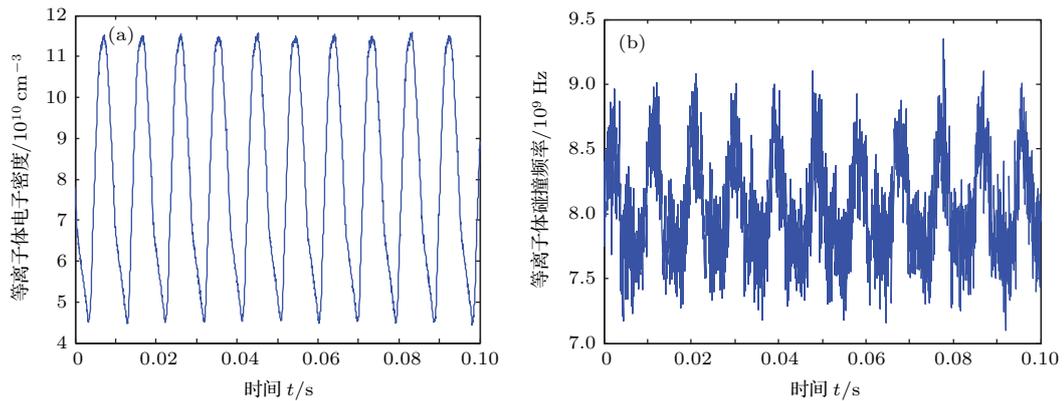


图3 (a) 等离子体电子密度随时间变化曲线; (b) 等离子体碰撞频率随时间变化曲线

Fig. 3. (a) The curve of electron density under different time; (b) the curve of collision frequency under different time.

图2是利用R&S公司ZND矢量网络分析仪的时域扫描功能测得的上述等离子体源对5.8 GHz电磁波造成的衰减和相移, ZND采样频率100 MHz, 得到的衰减和相移随时间做周期性变化. 图3是根据图2中的结果计算出的等离子体电子密度和碰撞频率随时间变化规律. 从图3可以看出等离子体的电子密度和碰撞频率近似按正弦规律变化, 实验测得等离子体的时变周期约为10 ms, 时变频率约为100 Hz. 实验测得的电磁波衰减最大的点(图2(a)的谷值点)对应电子密度的峰值处, 衰减最小的点(图2(b)的峰值点)对应电子密度的谷值处, 电子密度最大值约为 $1.15 \times 10^{11}/\text{cm}^3$, 最

小值约为 $4.4 \times 10^{10}/\text{cm}^3$. 碰撞频率的最大值约为8.8 GHz, 最小值约为7.5 GHz. 等离子体的时变周期是交流电频率的2倍, 原因是交流电在正半周和负半周均能触发产生放电.

3 多种调制方式信号在时变等离子体中误码率的实验研究

多进制数字相位调制(MPSK)抗噪声能力强, 一般被应用于军事系统, 以BPSK为例, BPSK系统接收信号的数学表达式为

$$s(t) = m(t) \cos(\omega t) + n(t). \quad (6)$$

在BPSK数字调制中,载波相位随着基带信号的变化而变化,载波相位的 0° 和 180° 分别代表基带信号的1和0。(6)式中为 $m(t)$ 基带信号, $\cos(\omega t)$ 为载波信号, $n(t)$ 为高斯白噪声.当上述信号经过时间变化的非磁化等离子体信道后,采用相干解调的BPSK信道的总误码率表达式为

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ e^{-\alpha(t)d} \cos[\beta(t)d] \sqrt{\gamma} \right\}, \quad (7)$$

式中, d 为等离子体的厚度, γ 为信道中高斯白噪声的信噪比, $\alpha(t)$ 是等离子体引起时变的衰减因子, $\beta(t)$ 是时变的相位因子.由(7)式分析可得:1)当高斯白噪声不变,等离子体厚度越大或等离子体密度越高,信号受到的衰减越大,从而导致系统总的信噪比下降,系统的误码率上升;2)在相干解调时,

如果等离子体电子密度时变剧烈,则相位偏移会随着等离子体密度的时变而在一定范围内抖动,那么接收机同步系统无法进行同步,从而不能提取载波信号携带的有用信息,误码率将会升高.

目前改善超高速飞行器再入段通信质量的方式主要是从减小电磁波能量衰减的角度来削弱等离子体鞘套对通信的影响^[13-15].但电磁波能量的衰减仅仅是造成通信中断的一方面,信道体制的选择同样至关重要^[6,7].误码率是衡量一个通信系统可靠性的主要性能指标之一,本节实验选取了多种调制方式,并对它们通过时间变化的等离子体信道后的误码率进行了比较,实验平台搭建如图4所示.

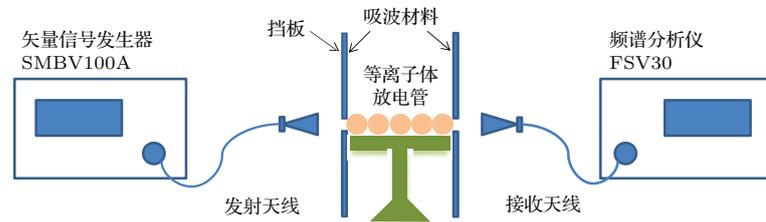


图4 实验原理框图

Fig. 4. The block diagram of experimental principle.

矢量信号发生器将基带信号进行数字调制,然后由发射天线发射出去,穿过等离子体层,再由接收天线接收,传输到频谱分析仪中进行能量相位分析和误码率计算.实验所用信号源和频谱仪的型号分别是R&S公司的SMBV100 A和FSV30.信号源有自带的基带信号编码器,可产生周期为511 bit的伪随机数二进制序列(PN9序列),码元速率为1 Mbit/s,然后进行基带调制,选择数字调制方式(BPSK, QPSK等多种调制方式),最后由1.5 GHz载波输出,信号源会循环地发射伪随机二进制序列,被频谱仪接收并用来统计误码率.由于等离子体电子密度和碰撞频率都是以10 ms为周期时变的,因此在测试的过程中,误码率会发生变动,要等到频谱仪上显示的误码率不再变化时方能记录,此时得到的数据便是电磁波经过时间变化的等离子体信道后的误码率.

通过图2(a),(b)可知,时变的等离子体信道的寄生调制效应不仅会使电磁信号的幅度电平不断随着时间变化,还会导致信号的相位发生较大幅度的抖动,这些干扰会额外增加信号检测判决的难度,使误码率变大.

如图5所示,实验选取了几种常见的调制方式,

对信噪比范围为 $-10-20$ dB,载波频率为1.5 GHz右旋圆极化信号的误码率进行了对比.在无等离子体环境下(图5(a)),选择MPSK(例如BPSK, QPSK, 8PSK)调制方式的误码率比其他的几种调制方式都要低,其中以BPSK调制方式最佳.当信噪比为5 dB时,BPSK调制通信系统的误码率低于 10^{-6} ,当信噪比高于5 dB时,BPSK调制误码率可以趋于0.而选择数字频率调制(BFSK)调制方式时,误码率最差,曲线趋近于一条直线.原因是由于PSK本身抗噪声的能力比幅移键控(ASK)和FSK都要强,且PSK不易受信道特性变化的影响^[16].而且由文献^[15]可知,BPSK对信噪比的响应最敏感,因此它随信噪比下降的趋势最快,其次是MPSK,然后是最小频移键控(MSK),下降最缓慢的是2FSK.在MPSK调制中,由于BPSK中码元的载波初始相位为 0 或 π ,能够正确接收的相位范围为 $\pm\pi/2$,而QPSK正确接收的相位范围为 $\pm\pi/4$,8PSK正确接收的相位范围为 $\pm\pi/8$,因此在相位会剧烈抖动的时变等离子体中,采用BPSK调制方式的抗噪声能力会更佳,误码率也会更低一些.

信道中存在时间变化等离子体时(图5(b)),所

有调制方式的误码率与没有等离子体时相比都增加了,且误码率曲线随信噪比增加而下降的趋势变得平缓了,这说明时变等离子体会使信道的通信质量变差.然而,BPSK调制方式的误码率曲线依旧低于其他的调制方式,在-5—20 dB信噪比范围内BPSK误码率比MSK和QPSK还要低一个数量级.这说明在时变等离子体信道中,BPSK作为信号的调制方式,通信性能最佳,其次是QPSK.因此在下一节实验中主要针对BPSK和QPSK调制方式研究等离子体信道磁化后的通信性能.

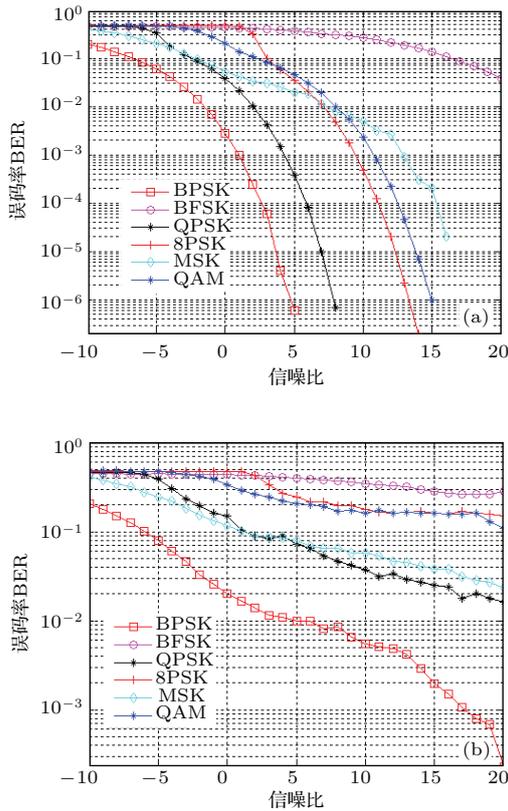


图5 (网刊彩色) 不同的调制信号的误码率随信噪比变化的曲线图 (a) 无等离子体; (b) 有等离子体

Fig. 5. (color online) BER of several kinds of modulation signal under different SNR: (a) In the air; (b) in the time-varying plasma.

4 L波段BPSK调制信号在时变磁化等离子体中通信性能的实验研究

(8)和(9)式分别表示电磁波在时变的磁化等离子体信道中的衰减因子和相移因子的计算公式,磁场平行于电磁波传播方向,

$$\alpha(t) = \frac{8.68\omega}{\sqrt{2}c} \left\{ \left[\left(1 - \frac{\omega \pm \omega_{ce}}{\omega} \frac{\omega_p^2(t)}{(\omega \pm \omega_{ce})^2 + \nu^2(t)} \right)^2 \right. \right.$$

$$\left. + \left(\frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2(t)}{(\omega \pm \omega_{ce})^2 + \nu^2(t)} \right)^2 \right]^{1/2} - \left(1 - \frac{\omega \pm \omega_{ce}}{\omega} \frac{\omega_p^2(t)}{(\omega \pm \omega_{ce})^2 + \nu^2(t)} \right) \right\}^{1/2} \quad (8)$$

(dB/m),

$$\beta(t) = \frac{\omega}{\sqrt{2}c} \left\{ \left[\left(1 - \frac{\omega \pm \omega_{ce}}{\omega} \frac{\omega_p^2(t)}{(\omega \pm \omega_{ce})^2 + \nu^2(t)} \right)^2 \right. \right. \left. + \left(\frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2(t)}{(\omega \pm \omega_{ce})^2 + \nu^2(t)} \right)^2 \right]^{1/2} + \left(1 - \frac{\omega \pm \omega_{ce}}{\omega} \frac{\omega_p^2(t)}{(\omega \pm \omega_{ce})^2 + \nu^2(t)} \right) \right\}^{1/2} \quad (9)$$

(rad/m),

ω 为工作角频率(rad/s); $\omega_p(t)$ 为等离子体角频率; $\nu(t)$ 为碰撞频率; ω_{ce} 为电子回旋频率.公式中“+”表示左旋圆极化波,“-”表示右旋圆极化波.

$$\omega_{ce} = \frac{|q_e|B_0}{m_e}.$$

文献[6,7]中已经验证了时变等离子体会对BPSK信号的幅度和相位造成寄生调制效应,使通信性能变差.而本次实验的目的是想观察磁场会对BPSK调制信号在时变等离子体信道中的通信性能(误码率、眼图、星座图)造成什么样的影响.

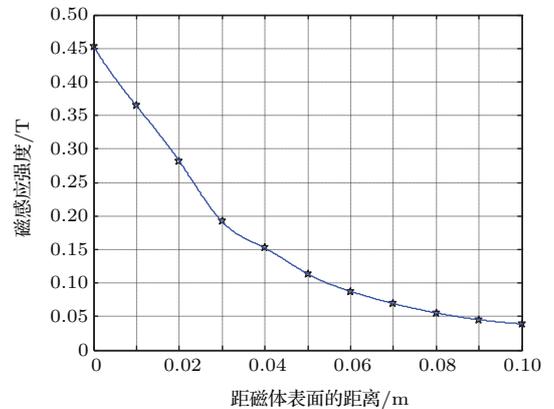


图6 实际测得的磁感应强度与距离的关系

Fig. 6. The actual measured magnetic induction intensity under different distance.

首先用载波频率为1.5 GHz的BPSK调制右旋圆极化信号分别经过无等离子体信道、时变等离子体信道和时变磁化等离子体信道,然后从信号的时变衰减、相移、星座图、眼图进行对比,比较分析磁场对时变等离子体信道通信性能的影响.实验中所用的磁场由高温烧结成的钕铁硼永磁材料来产生,磁感线沿水平方向由发射天线指向接收天线,

实际测得的永磁体磁感应强度与距磁体表面距离的关系曲线如图6所示.

图7(a)是非磁化时变等离子体对1.5 GHz右旋圆极化波造成的时变衰减曲线, 峰值为-22 dB. 图7(b)是磁化的时变等离子体对1.5 GHz右旋圆极化波造成的时变衰减曲线, 峰值为-7 dB. 图7(a)和(b)中衰减最小的点(即峰值点)所对应的等离子体电子密度是相同的, 但加入磁场以后等离子体对电磁波造成的衰减由-22 dB减小到-7 dB, 减小了15 dB. 图8(a)和(b)分别表示非磁化等离子体和磁化等离子体对电磁波造成附加的相移动随时间的变化情况, 由图8(a)可以看出

非磁化等离子体信道对1.5 GHz右旋电磁波造成的附加相移在-190°—280°之间随时间周期性变化, 相位抖动范围约90°, 时变周期大约10 ms. 图8(b)表示加入磁场后, 磁化等离子体信道对电磁波造成的附加相移有所减小, 变化幅度大概在-60°—-105°, 相位的抖动范围也减小到45°, 相比非磁化情况下相位抖动的变化减小了约一半. 图7和图8说明对时变的等离子体进行磁化不仅可以减小电磁波能量的衰减, 还能够减小由时变等离子体带来的相位抖动幅度, 这对相位调制体制的通信方式会有较好的改善作用, 能有效地减小由等离子体时变效应带来的误码.

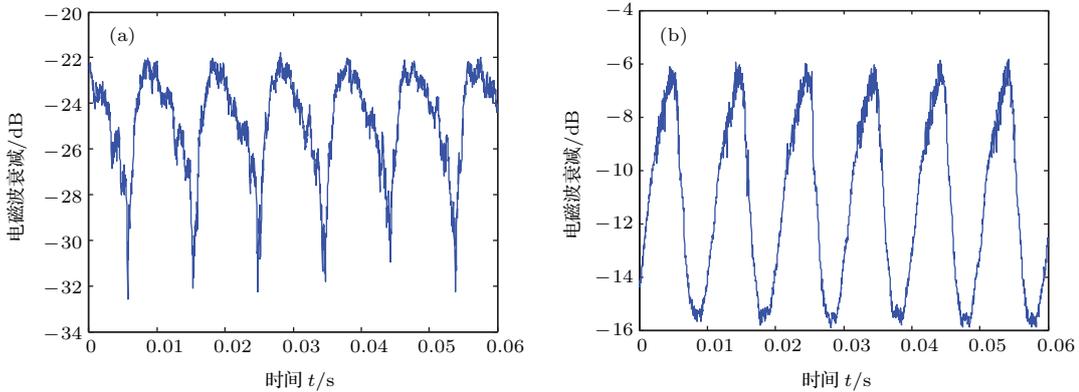


图7 1.5 GHz右旋圆极化波的时变衰减曲线 (a) 在非磁化等离子体信道中; (b) 在磁化等离子体信道中

Fig. 7. The time-varying attenuation of 1.5 GHz RCP waves: (a) In un-magnetized plasma; (b) in magnetized plasma.

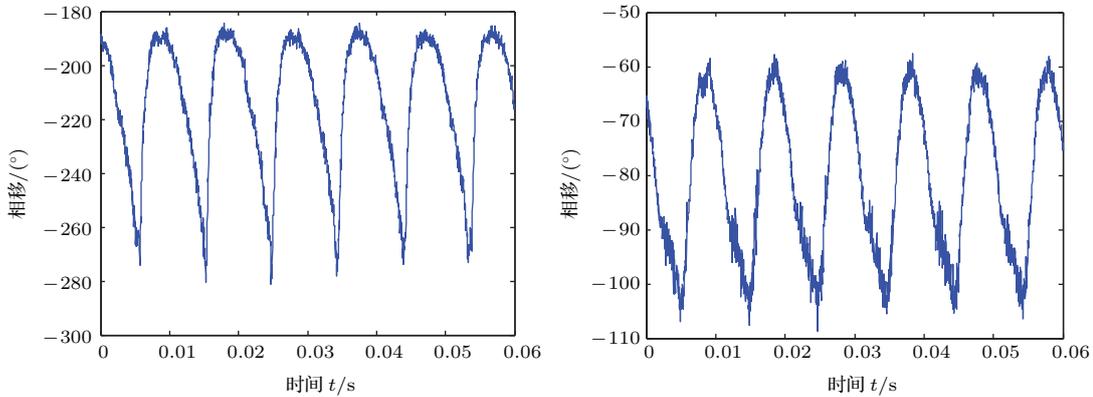


图8 1.5 GHz右旋圆极化波时间扫描的相移曲线 (a) 在非磁化等离子体信道中; (b) 在磁化等离子体信道中

Fig. 8. The time-varying phase shift of 1.5 GHz RCP waves: (a) In un-magnetized plasma; (b) in magnetized plasma.

在数字通信系统设计中, 星座图是分析数字调制方式性能的经典工具, 也是判断数字调制误码率的有效手段. (10)和(11)式表示星座图中的模和相角^[7], 可以看出, 每个星座点的模和相角由等离子体的衰减因子、相移因子和厚度决定.

$$\sqrt{I^2 + Q^2} = \sqrt{E_s} \exp(-\alpha(t)d), \quad (10)$$

$$\frac{I}{Q} = \tan\left(\left(i-1\right)\frac{\pi}{2} - \beta(t)d\right). \quad (11)$$

等离子体的时变特性会对信号产生寄生的幅度调制和相位调制, 幅度调制效应会造成电磁波时变的衰减, 一般情况下, 幅度调制效应可以通过接收机的自动增益控制(AGC)来平衡, 然而如果某

一时刻信号幅度太小, 自动增益控制放大信号幅度的同时, 各种噪声也会随着放大, 进而会造成信号的信噪比下降, 误码率提高.

由图 9(a) 可以看到, 当信道中没有等离子体时, 信号解调后的星座图是横轴上的两个点, 相位分别为 0 和 π ; 图 9(b) 是 1.5 GHz 右旋信号在时间变化等离子体信道中传输的星座图, 可以看到星座图非常散乱, 信号受噪声影响很大, 与理想情况下的星座点偏离较远, 此时根本无法实现通信功能. 图 9(c) 是在相同信噪比下, 改用 2.5 GHz 右旋载波进行通信, 结果发现提高载波频率也能减弱等离子体对通信的影响, 图 9(c) 中星座点有所收敛但仍达不到可靠通信的地步. 图 9(d) 是 1.5 GHz 右旋信号在磁化时变等离子体信道中传输后的星座图, 虽

然星座点仍然有些发散, 信号检测判决裕度有所下降, 但星座图的点基本聚拢在理想矢量点附近, 这说明加磁场能起到改善等离子体信道的通信性能、降低误码率的效果.

眼图是为了估计通信系统的传输性能, 并能在电子测量仪器上直接显示的一种图形, 可以很直观地看出码间串扰和噪声的强弱. 当信号的幅度衰减变大时, 眼图整体的幅度会变小. 当噪声变大时, “眼睛” 张开的幅度会减小, 同时线迹的宽度会变宽, 这说明码间串扰严重, 误码率升高. 图 10 中由于 AGC 的作用, 眼图整体幅度基本不变, 但由于等离子体调制效应引入的噪声变大, “眼睛” 张开的大小和线迹宽度会发生变化.

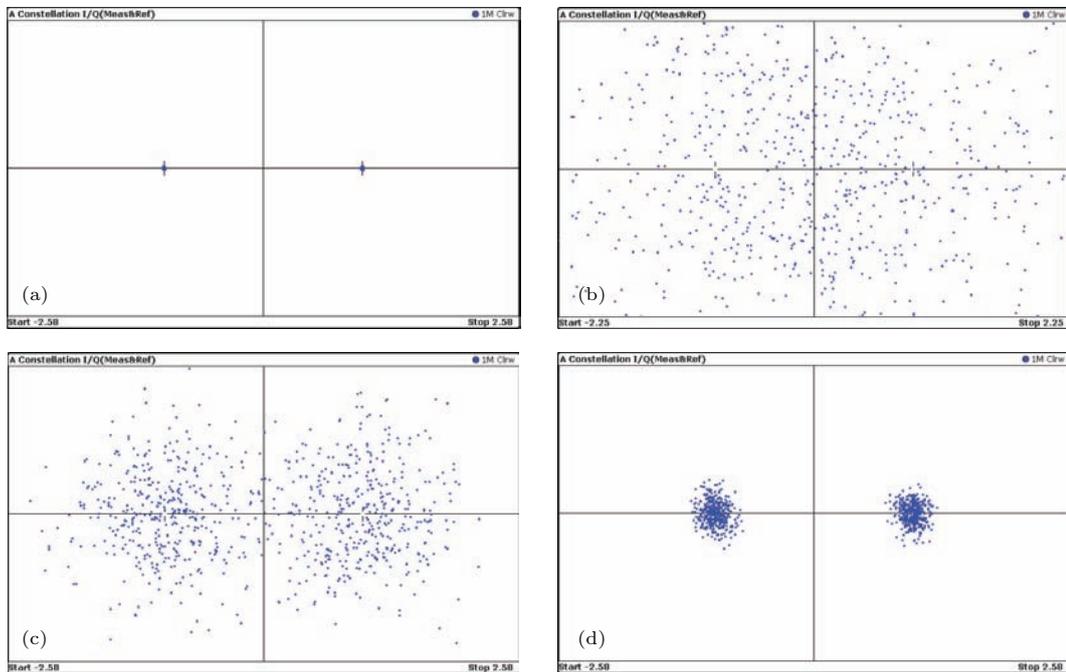


图 9 BPSK 调制信号在时间变化的磁化等离子体和非磁化等离子体中的星座图 (a) 1.5 GHz 信号在无等离子体信道传输后的星座图; (b) 1.5 GHz 信号在有等离子体信道中传输后的星座图; (c) 2.5 GHz 的信号在有等离子体信道中传输后的星座图; (d) 1.5 GHz 信号在磁化等离子体信道中传输后的星座图

Fig. 9. The constellation diagram of BPSK modulation signal in time-varying magnetized plasma and un-magnetized plasma: (a) The constellation diagram of 1.5 GHz in the air; (b) the constellation diagram of 1.5 GHz in the un-magnetized plasma channel; (c) the constellation diagram of 2.5 GHz in the un-magnetized plasma channel; (d) the constellation diagram of 1.5 GHz in the magnetized plasma channel.

从图 10(a) 可知, 当信号穿过无等离子体信道时, 眼图的“眼睛”张得最大, 而且线迹相对来说最清楚, 这说明传输性能最好. 比较图 10(b) 和(c), 当信号在有等离子体信道中传输时, 眼图线迹变得很宽很混乱, 1.5 GHz 信号在时变等离子体中传输时, 已经看不到眼图轮廓, 说明信号已经杂乱不堪, 根本无法解调; 2.5 GHz 载波的信

号相对 1.5 GHz 的信号眼图要清晰一些, 这说明提高载波频率确实能减缓由时变等离子体带来的寄生调制效应. 图 10(d) 是加磁场后 1.5 GHz 接收信号眼图的轮廓, 与非磁化时变等离子体信道的眼图(图 b) 相比已经有很大改观, 已接近无等离子体情况下的眼图, 说明通信性能确实有所改观.

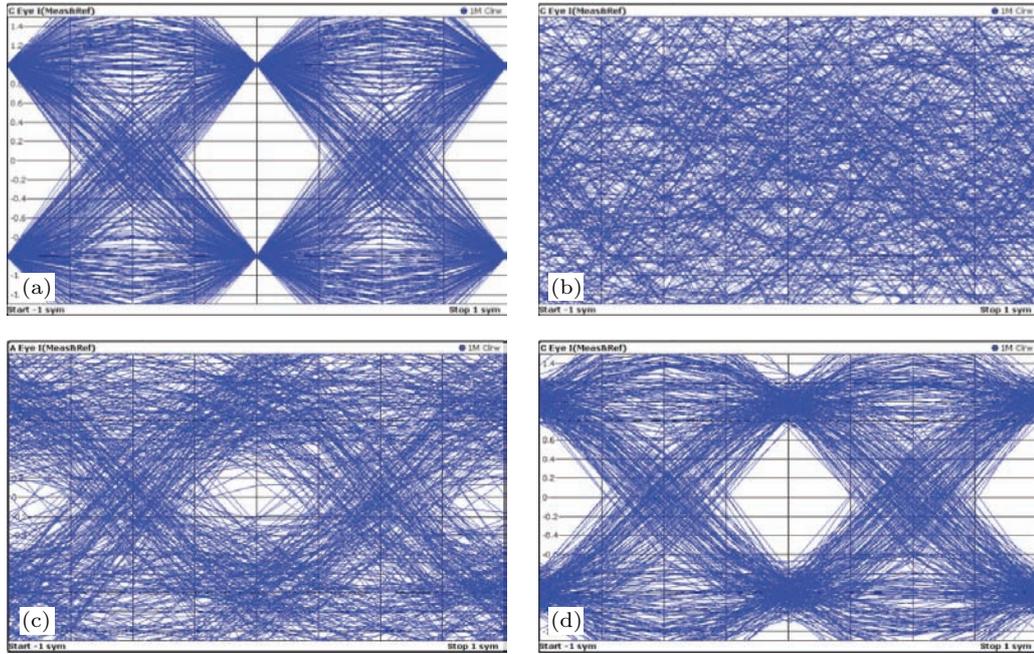


图 10 BPSK 调制信号在时间变化的磁化等离子体和非磁化等离子体中的眼图 (a) 1.5 GHz 信号在无等离子体信道传输时的眼图; (b) 1.5 GHz 信号在时间变化的等离子体信道中传输时的眼图; (c) 2.5 GHz 信号在时间变化的等离子体信道中传输时的眼图; (d) 1.5 GHz 信号在时间变化的磁化等离子体信道中传输时的眼图

Fig. 10. The eye pattern of BPSK modulation signal in time-varying magnetized plasma and un-magnetized plasma: (a) The eye pattern of 1.5 GHz in the air; (b) the eye pattern of 1.5 GHz in the un-magnetized plasma channel; (c) the eye pattern of 2.5 GHz in the un-magnetized plasma channel; (d) the eye pattern of 1.5 GHz in the magnetized plasma channel.

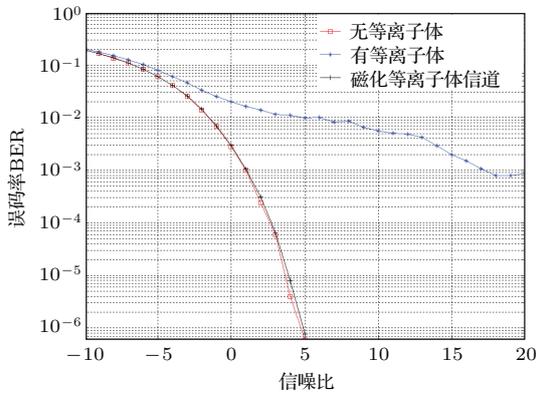


图 11 BPSK 调制信号在不同的信道中传输的误码率曲线图

Fig. 11. The BER of BPSK modulation signal in different channels.

最后, 观察一下误码率的变化. 信号在时变等离子体信道中传输时, 由于受到时变等离子体的寄生调制影响, 信号的幅度和相位都会被调制, 从而使接收到的信号产生误码. 图 11 是载波频率为 1.5 GHz 的 BPSK 右旋圆极化信号在无等离子体信道、时变等离子体信道和磁化时变等离子体信道中传输时误码率随信噪比的关系曲线对比. 从图 11 可以看出, 磁化等离子体信道误码率曲线非

常接近无等离子体信道的误码率变化曲线, 当信噪比大于 0 dB 时, 磁化等离子体信道的误码率快速下降, 而非磁化等离子体信道随信噪比增加下降速度缓慢. 当信噪比达到 5 dB 时, 磁化等离子体信道误码率小于 10^{-6} , 与没有等离子体情况下的误码率基本一致, 而非磁化时变等离子体信道误码率高达 10^{-2} . 由此可以得出结论: 对时间变化的等离子体信道加入磁场磁化可以有效地降低误码率, 减少码间串扰.

5 S 波段 QPSK 调制信号在时变磁化等离子体中通信性能的实验研究

L 和 S 波段为飞行器通信导航的常用频段, 因此在上节的基础上, 这一节改变载波频率, 研究 S 波段 2.5 GHz 右旋圆极化信号在磁化与非磁化时变等离子体中通信性能的变化规律. 图 12(a) 为非磁化等离子体信道对 2.5 GHz 右旋圆极化波造成的时变衰减曲线, 峰值为 -10 dB, 谷值为 -45 dB. 图 12(b) 是磁化等离子体对 2.5 GHz 右旋圆极化波造成的时变衰减曲线, 峰值为 -8.6 dB, 谷值为

-25 dB. 比较图 12(a) 和 (b) 可以看出磁化以后虽然在等离子体密度低时(峰值处), 磁场抑制衰减的效果不明显, 但在等离子体密度较高时(谷值处), 磁场的加入使电磁波衰减减小了近 20 dB. 图 13 是

2.5 GHz 右旋圆极化波在磁化时变等离子体和非磁化时变等离子体中相移曲线对比, 非磁化下相位抖动约为 110° , 而磁化后相位抖动约为 90° , 抖动幅度有所下降, 但是下降幅度不大.

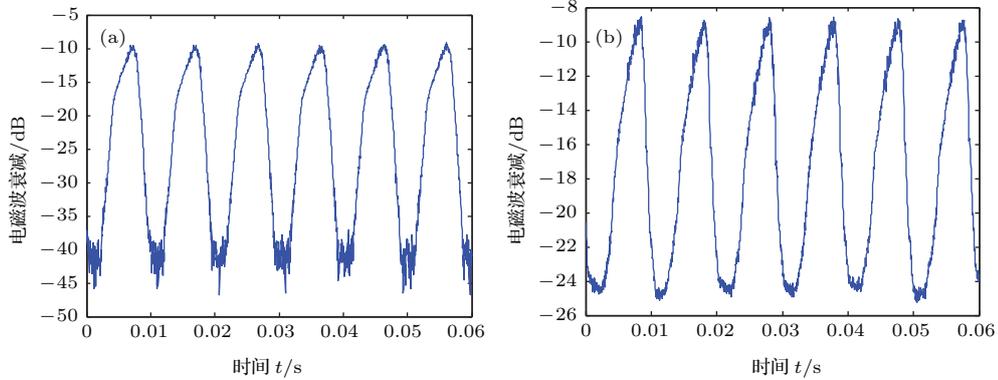


图 12 2.5 GHz 右旋圆极化波的时变衰减曲线 (a) 在非磁化等离子体中; (b) 在磁化等离子体中

Fig. 12. The time-varying attenuation of 2.5 GHz RCP waves: (a) In a un-magnetized plasma; (b) in a magnetized plasma.

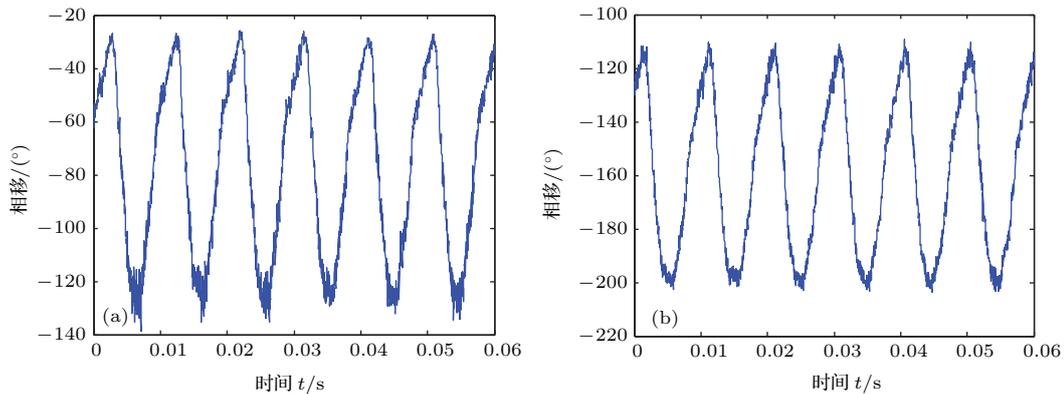


图 13 (a) 2.5 GHz 右旋圆极化波时间扫描的相移曲线 (a) 在非磁化等离子体中; (b) 在磁化等离子体中

Fig. 13. The time-varying phase shift of 2.5 GHz RCP waves: (a) In un-magnetized plasma; (b) in magnetized plasma.

图 14—图 16 分别是载波为 2.5 GHz 右旋圆极化 QPSK 信号经过无等离子体信道、非磁化时变等离子体信道和磁化时变等离子体信道后接收到信号的星座图和眼图. 从图 15(a) 和 (b) 可以看出, 2.5 GHz 右旋 QPSK 信号经过非磁化时变等离子体信道后, 由于受到寄生的幅度调制和相位调制的影响, 接收的信号码间串扰严重, 检测判决裕度比没有等离子体时也明显下降, 眼图和星座图变得模糊不清. 图 16(a) 和 (b) 是时变等离子体中加入磁场后星座图和眼图的变化情况, 从磁化后的眼图和星座图可以看出, 虽然磁场的加入不能完全解决等离子体带来的通信质量下降问题, 达到无等离子体时的通信性能, 但在一定程度上缓解了时变等离子体

对通信性能造成的负面影响.

图 17 是载波频率为 2.5 GHz 的 QPSK 调制信号经过无等离子体信道、非磁化时变等离子体信道和磁化时变等离子体信道后的误码率与信噪比的关系曲线, 从图中可以看出, 随着信噪比的增加, 三种信道的误码率都呈现下降的趋势, 但信噪比超过 0 dB 后, 随着信噪比的增加, 无等离子体的信道误码率下降趋势最快, 其次是磁化的时变等离子体信道, 磁化后的误码率比较接近无等离子体信道, 下降最慢的是非磁化时变等离子体信道, 这说明磁场对 S 波段 QPSK 调制信号在等离子体中的通信质量也有很好的改善作用.

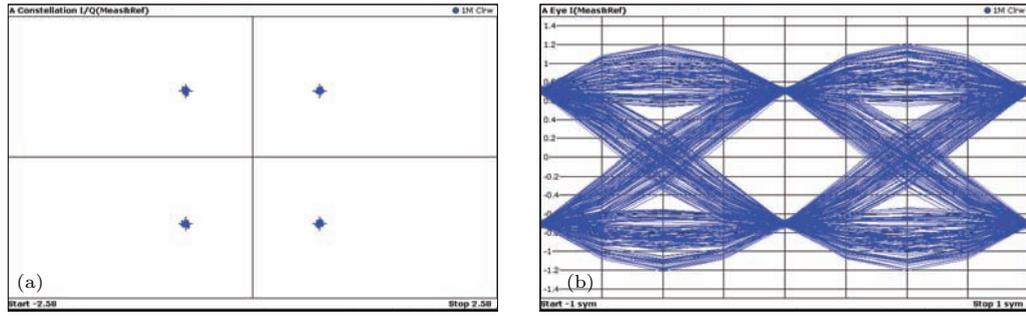


图 14 (a) 2.5 GHz 右旋 QPSK 信号在无等离子体时的星座图; (b) 2.5 GHz 右旋 QPSK 信号在无等离子体时的眼图
Fig. 14. (a) The constellation diagram of 2.5 GHz RCP QPSK modulation signal without plasma; (b) the eye pattern of 2.5 GHz RCP QPSK modulation signal without plasma.

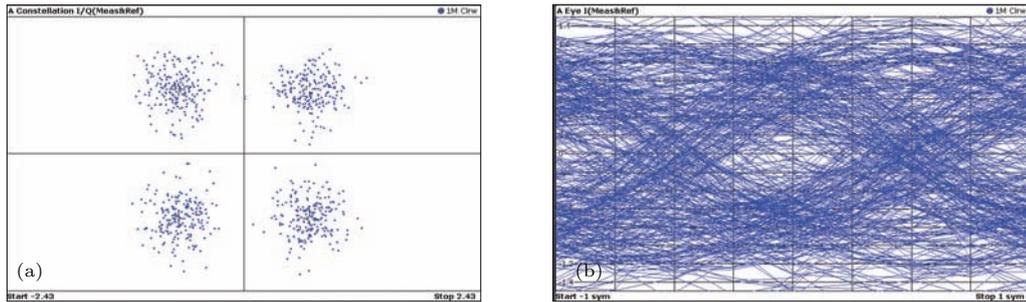


图 15 (a) 2.5 GHz 右旋 QPSK 信号在非磁化时变等离子体信道的星座图; (b) 2.5 GHz 右旋 QPSK 信号在非磁化时变等离子体信道的眼图
Fig. 15. (a) The constellation diagram of 2.5 GHz RCP QPSK modulation signal in the un-magnetized time-varying plasma; (b) the eye pattern of 2.5 GHz RCP QPSK modulation signal in the un-magnetized time-varying plasma.

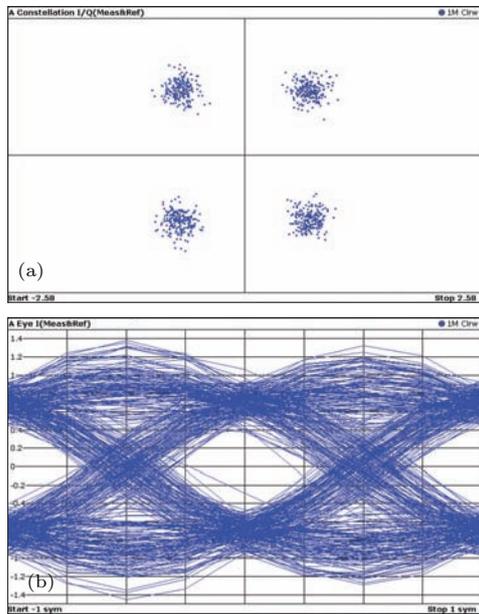


图 16 (a) 2.5 GHz 右旋 QPSK 信号在磁化时变等离子体信道的星座图; (b) 2.5 GHz 右旋 QPSK 信号在磁化时变等离子体信道的眼图
Fig. 16. (a) The constellation diagram of 2.5 GHz RCP QPSK modulation signal in the magnetized time-varying plasma; (b) the eye pattern of 2.5 GHz RCP QPSK modulation signal in the magnetized time-varying plasma.

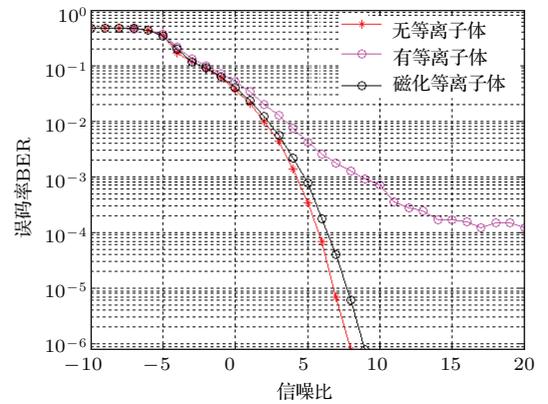


图 17 载波为 2.5 GHz 右旋圆极化 QPSK 信号在无等离子体信道、非磁化时变等离子体信道和磁化时变等离子体信道中误码率随信噪比变化曲线
Fig. 17. The BER of 2.5 GHz RCP QPSK modulation signal in air channel, un-magnetized time-varying plasma channel and magnetized time-varying plasma channel.

6 结 论

1) 各种调制体制的信号在时变等离子体信道中传输时, MPSK 调制方式与其他调制方式相比有着更低的误码率, BPSK 调制方式通信质量最佳。

2) 引入磁场可以改善时变等离子体信道的通信性能, 降低信号误码率. 原因分析: 一是磁场的加入可以减小电磁波在等离子体中的衰减, 这样能够保证通信系统的信噪比不致太低, 从而改善通信性能; 二是可以抑制相位抖动的剧烈程度, 从而降低码间串扰.

本文首先利用 5.8 GHz 电磁波经过时变等离子体的衰减和相移, 求解方程对时变等离子体进行诊断, 得出时变等离子体碰撞频率和电子密度随时间的变化规律. 然后搭建实验平台, 测量了 L 波段各种调制体制信号在时变等离子体信道的误码率随信噪比变化的规律. 实验结果发现在信噪比一定的情况下, BPSK 调制方式与其他的调制方式相比有最小的误码率. 而后针对 L 波段 BPSK 调制的右旋圆极化电磁波, 测试了它通过磁化时变等离子体信道后的衰减、相移的时变规律, 观察了它的眼图和星座图, 并与非磁化等离子体信道参数进行对比, 实验结果发现在时变等离子体信道中加入磁场, 不仅可以减少 L 波段电磁波能量的衰减, 还能抑制相移抖动和码间串扰, 从而降低 BPSK 调制信号在等离子体信道中的误码率. 此外, 为了研究磁场对其他频段电磁波通信性能的影响, 又对载波为 2.5 GHz 的右旋圆极化 QPSK 调制信号进行了实验研究, 结果表明磁场对 S 波段的改善效果与 L 波段基本类似. 下一步需要开展电磁波在时变等离子体的衰减与相移的仿真研究, 以便与实验得到的结果进行对比.

参考文献

[1] Petrin A B 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 3

- [2] Korotkevich A O, Newell A C, Zakharov V E 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 083305
- [3] Kim M, Keidar M 2010 *Journal of Spacecraft and Rockets* **47** 1
- [4] Kundrapu M, Loverich J, Beckwith K, Stoltz P 2014 *IEEE 41st International Conference on Plasma Sciences (ICOPS)* Washington, DC, May 25–29, 2014 p1
- [5] Kundrapu M, Loverich J, Beckwith K, Stoltz P 2015 *Journal of Spacecraft and Rockets* **52** 853
- [6] Yang M, Li X P, Xie K 2013 *Journal of Astronautics* **34** 6 (in Chinese) [杨敏, 李小平, 谢楷 2013 宇航学报 **34** 6]
- [7] Yang M, Li X P, Liu Y M, Shi L, Xie K 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 085201 (in Chinese) [杨敏, 李小平, 刘彦明, 石磊, 谢楷 2014 物理学报 **63** 085201]
- [8] Lin T C, Sproul L K 2006 *Comput. Fluids* **35** 703
- [9] Shawn G O, Brlan E G, Ferguson S D 1999 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **27** 587
- [10] Wu R H, Liu H Y, Liu J Q, Chang Q 2013 *Beijing Univ. Aeronaut.* **18** 585 (in Chinese) [鄢润辉, 刘洪艳, 刘佳琪, 常青 2013 北京航空航天大学学报 **18** 585]
- [11] Roth J R 1995 *Industrial Plasma Engineering* (Philadelphia: Inst. Phys. Publishing) pp15–20
- [12] Howlader M K, Yang Y Q, Roth J R 2005 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **33** 1093
- [13] Zheng L 2013 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [郑灵 2013 博士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [14] Zheng L, Zhao Q, Luo X G, Ma P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 155203 (in Chinese) [郑灵, 赵青, 罗先刚, 马平 2012 物理学报 **61** 155203]
- [15] Zheng L, Zhao Q, Liu S Z, Xing X J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 245202 (in Chinese) [郑灵, 赵青, 刘述章, 邢晓俊 2012 物理学报 **61** 245202]
- [16] Fan C X, Cao L N 2013 *Principle of Communication* (Beijing: National Defense Industry Press) p216 (in Chinese) [樊昌信, 曹丽娜 2013 通信原理 (北京: 国防工业出版社) 第 216 页]

Experimental study of the communication performance of electromagnetic wave in time-varying and magnetized plasma channel*

Bo Yong^{1)†} Zhao Qing^{1)‡} Luo Xian-Gang²⁾ Fan Jia¹⁾ Liu Ying¹⁾ Liu Jian-Wei¹⁾

1) (School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

2) (State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(Received 20 November 2015; revised manuscript received 11 December 2015)

Abstract

In this paper the influences of the time-varying plasma and magnetized time-varying plasma on the communication performance are investigated. Using a 5.8 GHz microwave source, the electron density and collision frequency of the time-varying glow discharge plasma are measured. An experimental platform is set up to test the bit error rates (BERs) of a variety of the modulation signals after going through the time-varying plasma channel. The experimental results show that the binary phase shift keying (BPSK) modulation signal has a minimal communication BER. Meanwhile, the variations of L-band BPSK and S-band QPSK (quadrature phase shift keying) signal's eye diagram, and the constellation diagram, and the variation of energy after a magnetized plasma are observed. Compared with the un-magnetized situation, the magnetized plasma communication performance is greatly improved and the BER becomes much lower. The results prove that the magnetic field can effectively relieve the amplitude modulation and phase modulation caused by the plasma channel.

Keywords: time-varying channel, magnetized plasma, modulation system, reliable communication

PACS: 52.25.Os, 52.40.Db, 41.20.Jb

DOI: [10.7498/aps.65.055201](https://doi.org/10.7498/aps.65.055201)

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA7022016), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11275045), and the Scientific Research Foundation of the Education Department of Sichuan Province, China (Grant No. 2013GZ01333).

† Corresponding author. E-mail: boyong_boyong@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: zhaoq@uestc.edu.cn