

信号在时变等离子体中的传播特性*

杨敏[†] 李小平 刘彦明 石磊 谢楷

(西安电子科技大学空间科学与技术学院, 西安 710071)

(2013年8月22日收到; 2013年12月16日收到修改稿)

高速飞行器等离子鞘套由于飞行姿态调整、湍流、非均匀烧蚀等因素的影响,使其等离子体参数存在时变特性. 针对这种传输介质的快速时变特性引起的电波幅度、相位上的寄生调制效应,本文利用大面积辉光放电等离子体产生装置,搭建了等离子体中信号传输实验系统,进行了S频段的单频信号与调制信号传输实验,观测验证了调制效应的存在,且其调制频率与等离子体变化频率具有一致性,进一步分析了等离子体参数与寄生调制效应的关系. 理论和实验结果表明:即使当载波频率大于等离子体频率时,时变等离子体引起的寄生调制效应也会使传输信号的星座图发生旋转,造成其判决容差裕度变小,通信可靠性下降,并且载波频率越接近等离子体频率时,其寄生调制效应越强烈.

关键词: 时变等离子体, 电磁信号传输, 寄生调制效应, 等离子体产生

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

DOI: 10.7498/aps.63.085201

1 引言

当飞行器以10—25马赫的高超声速在大气层中飞行时,由于高速摩擦,在飞行器周围形成等离子体鞘套. 现有研究表明,等离子体对电磁信号传播的影响主要有幅度衰减和相移两方面,影响程度与等离子体电子密度、碰撞频率和信号载波频率等参数密切相关^[1]. 当载波频率小于或接近等离子体频率时,电波信号将发生严重的反射和衰减,无法穿透等离子体,导致飞行器与外界无线通信中断,产生“黑障”现象^[2-4]. 一直以来,这种现象被认为是等离子体鞘套造成通信中断的主要原因^[5,6]. 至今为止,为解决等离子体鞘套通信黑障问题,主要还是从降低鞘套对电波的衰减作用,提高电波透射出鞘套的能量的角度进行研究^[2,7-10]. 文献^[7-10]采用激波管产生等离子体,进行电波在等离子体中的传播实验,认为提高通信频率是解决黑障问题的有效途径. 其中,文献^[8]对35与96 GHz电磁波在等离子体中的传播进行了理论与实验研究,得到了电磁

波衰减随电波频率、等离子体频率以及碰撞频率的变化规律. 文献^[9]进行了太赫兹波在等离子体中的传播实验. 文献^[10]进行四相相移键控(QPSK)信号的传输实验,对信号眼图变化进行分析. 但是激波管产生的等离子体不能长时间持续,不利于较长时间的通信实验. 此外,亲电子物质喷射、电磁二维窗等等离子鞘套削弱方法也被认为是克服黑障问题的有效途径^[11,12].

近年来有研究表明,由于高超飞行器飞行姿态调整、边界层湍流、非均匀烧蚀等因素的影响,电子密度等鞘套参数并不恒定^[13-16]. 文献^[14, 15]指出,电波在时变等离子体中传播其幅度和相位均会发生寄生调制,严重干扰通信信号,造成通信中断. 其中文献^[14]分析了再入过程等离子体鞘套的时变性对载波频率为10和44 GHz的电磁波的幅度、相位的影响,指出当频率较高时,影响程度明显减弱. 文献^[15]分析了宇宙空间飞行器的等离子体推进器(SPT)产生的等离子体尾焰造成通信信号频谱发生弥散,指出等离子体变化频率为17 kHz的等

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2014CB340205)、国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 61301173)和中央高校基本科研业务费(批准号: K72125087)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: merovingia1911@126.com

离子尾焰使载波的功率谱上产生了额外的频率分量, 其寄生频率点偏离了载波频点 17 kHz. 这种寄生调制将严重干扰信号的捕获跟踪以及同步等环节. 文献 [16] 研究了时变等离子体对不同载波频率的电波的调制效应, 认为调制效应的强度取决于载波频率、等离子体电子密度与碰撞频率之间的关系.

研究等离子体对电波传播影响的主要手段有飞行实验、地面模拟实验以及数值仿真等手段. 飞行实验是最具真实性的实验方法, 但是其成本高昂, 且在实验参数控制、数据取回等方面存在诸多不确定性因素. 地面模拟实验的经济性与真实性成为现在主要的研究手段 [7-10, 17-19]. 本文利用一种基于辉光放电原理的长时间、大面积均匀等离子体产生装置 [17], 搭建了一套可持续、电子密度连续可控、实验重复性好、无恶劣环境的等离子体中信号传播的地面实验系统. 该系统通过注入变化的电压, 制造出快速时变的等离子体, 在此基础上进行 S 频段的单频信号与调制信号传输实验. 通过理论分析和实验手段, 对信号在时变等离子体中的传输特性进行了研究.

2 信号在时变等离子体中的传播特性

等离子体是由正离子、自由电子和中性原子组成的宏观中性电离气体, 其运动主要受电磁力的支配, 并表现出显著的集体行为. 从电波传播角度而言, 等离子体可以等效为一种色散有耗介质, 等离子体中的电波传播与电波频率、等离子体频率以及碰撞频率密切相关. 本文所研究的时变等离子体是指电子密度具有时间变化性, 假设碰撞频率为常数. 电子密度表示为 $n_e(t)$, 时变等离子体的等离子体频率可以表示为

$$\omega_p(t) = \sqrt{\frac{n_e(t)e^2}{\epsilon_0 m_e}}, \quad (1)$$

其中, e 表示电子电荷, m_e 表示电子质量, ϵ_0 表示真空中的介电常数. 电子密度的变化会引起电流密

度的变化:

$$\Delta j(t) = -en_e(t)v(t), \quad (2)$$

$n_e(t)$ 表示电子密度变化值. 其中 $v(t)$ 是电子运动速率, 由下式决定:

$$m_e \frac{dv(t)}{dt} = -eE - m_e \nu_{en} v(t). \quad (3)$$

从 (1), (2) 和 (3) 式中, 依据麦克斯韦方程, 可以推导出时变等离子体的电导率和介电常数:

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \frac{e^2 N_e(t) \nu_{en}}{m_e (\omega^2 + \nu_{en}^2)} \\ &= \epsilon_0 \frac{\omega_p^2(t) \nu_{en}}{\omega^2 + \nu_{en}^2}, \\ \epsilon(t) &= 1 - \frac{e^2 N_e(t)}{m_e \epsilon_0 (\omega^2 + \nu_{en}^2)} \\ &= 1 - \frac{\omega_p^2(t)}{\omega^2 + \nu_{en}^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

进而, 时变等离子体的复介电常数为

$$\begin{aligned} \epsilon_r(t) &= \epsilon(t) - j \frac{\sigma(t)}{\epsilon_0 \omega} \\ &= 1 - \frac{\omega_p^2(t)}{\omega^2 + \nu_{en}^2} - j \frac{\nu_{en}}{\omega} \frac{\omega_p^2(t)}{\omega^2 + \nu_{en}^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中, ω 是载波频率, ν_{en} 是等离子体碰撞频率, 假设其为常数. 由于电子密度的时变特性, 时变等离子体复介电常数也是随时间变化的. 假设在一维时变等离子体中, 垂直入射的电磁波可以表示为

$$\mathbf{E} = E_0 \exp(j(\omega_0 t - k(t)z)) \mathbf{e}_z, \quad (6)$$

其中传播系数 $k(t)$ 是由载波频率 ω_0 和等离子体相对介电常数常数 $\tilde{\epsilon}_r(t)$ 所决定的:

$$k(t) = \beta(t) - j\alpha(t) = \omega_0 \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \tilde{\epsilon}_r(t)}, \quad (7)$$

其中, μ_0 是真空中的磁导率, ϵ_0 是真空中的介电常数, z 是等离子体厚度; $\alpha(t)$ 是衰减系数, $\beta(t)$ 是相移系数, 均是随时间变化的. 进一步可表示为

$$\alpha(t) = \frac{\omega}{\sqrt{2}c} \sqrt{\frac{\omega_p^2(t)}{\omega^2 + \nu_{en}^2} - 1 + \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2(t)}{\omega^2 + \nu_{en}^2}\right)^2 + \left(\frac{\nu_{en}}{\omega} \frac{\omega_p^2(t)}{\omega^2 + \nu_{en}^2}\right)^2}}, \quad (8)$$

$$\beta(t) = \frac{\omega}{\sqrt{2}c} \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2(t)}{\omega^2 + \nu_{en}^2} + \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2(t)}{\omega^2 + \nu_{en}^2}\right)^2 + \left(\frac{\nu_{en}}{\omega} \frac{\omega_p^2(t)}{\omega^2 + \nu_{en}^2}\right)^2}}. \quad (9)$$

均匀等离子体内平面波进一步推导为

$$E = E_0 \exp(-\alpha(t)z) [\exp(j(\omega_0 t - \beta(t)z))]. \quad (10)$$

由此可见, 时变等离子体不仅会引起固定的衰减和相移, 也会对电磁波造成时变衰减和相位抖动, 这种时变特性与电子密度变化形式密切相关. 与加性干扰所造成幅度相位变化不同, 它是一种乘性干扰. 从信号角度来说, 这种幅度和相位的时变特性实际上是一种幅度和相位上的双重寄生调制. 而这种调制不仅受到等离子体变化形式的影响, 且由于等离子体是色散介质, 具有强烈的频率选择性, 调制效应的程度也与载波频率密切相关. 有资料表明, 再入等离子鞘套的电子密度抖动频率变化范围是 20—100 kHz^[13], 其频率与大多数测控通信体制的码元速率处于同一个量级, 很难通过均衡、自动增益控制等接收机技术消除动态等离子体引起的寄生调制效应.

假设输入信号是多进制数字相位调制 (MP-SK) 信号:

$$s_{\text{MPSK}}(t) = \sqrt{\frac{2E_S}{T_S}} \cos \left[2\pi f_c t + (i-1) \frac{\pi}{2} \right]$$

$$\begin{aligned} s_I(t) &= \sqrt{E_S} \exp(-\alpha(t)z) \cos \left[(i-1) \frac{\pi}{2} - \beta(t)z \right] \phi_1(t) \\ s_Q(t) &= \sqrt{E_S} \exp(-\alpha(t)z) \cos \left[(i-1) \frac{\pi}{2} - \beta(t)z \right] \phi_2(t) \end{aligned} \quad (i = 1, 2, \dots, m). \quad (15)$$

若等离子体引起的幅度相位调制与码率处于同一量级, 寄生调制干扰无法通过均衡、同步或自动增益控制等环节消除, 干扰将传递到信号检测环节上去, 此时信号不再是恒包络, 幅度出现了起伏, 而相位项引入了乘性干扰, 可能会使星座点的距离减小, 增加差错概率.

文献 [16] 的研究结果表明, 寄生调制效应的大小由载波频率和等离子体参数共同决定. 当碰撞频率一定, 载波频率小于等离子体频率时, 电波发生严重衰减, 通信链路已断, 此时应考虑如何减弱等离子体对电磁波的衰减作用, 现有的方法就是通过提高载波频率至毫米波甚至太赫兹波段, 使电波频率高于等离子体频率; 或者采用亲电子喷射、电磁二维窗等物理干预手段降低等离子体电子密度, 使等离子体频率低于载波频率, 并不需要考虑寄生调制效应. 当载波频率大于等离子体频率时, 电波能量虽有一定损耗, 但仍存在信号传输通路, 此时时变等离子体所引起的寄生调制效应将会对信号产生干扰,

$$(0 \leq t \leq T_s, i = 1, 2, \dots, m), \quad (11)$$

其中, T_s 为符号持续时间. 如果 MPSK 信号集的基底函数:

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_S}} \cos(2\pi f_c t), \quad (12)$$

$$\phi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_S}} \sin(2\pi f_c t), \quad (13)$$

定义在 $0 \leq t \leq T_s$ 的间隔内, 那么信号集内的 m 个信号可由基底信号表示为

$$\begin{aligned} s_{\text{MPSK}}(t) &= s_I(t) - s_Q(t) \\ &= \sqrt{E_S} \cos \left[(i-1) \frac{\pi}{2} \right] \phi_1(t) \\ &\quad - \sqrt{E_S} \cos \left[(i-1) \frac{\pi}{2} \right] \phi_2(t) \end{aligned} \quad (i = 1, 2, \dots, m). \quad (14)$$

经过时变等离子体后, MPSK 信号的幅度和相位均发生了寄生调制:

降低通信质量, 并且寄生调制强度与载波频率呈反比, 与等离子体频率呈正比. 所以, 研究调制效应对通信信号的影响时, 主要考虑载波频率高于等离子体频率的情况. 本文进行通信信号传输实验所选取的频率点属于常见的 S 波段, 实验所产生的等离子体平均电子密度属于 10^{10} cm^{-3} 量级.

3 信号在时变等离子体中的传播实验与结果分析

3.1 实验系统配置

3.1.1 等离子体产生装置

本文利用文献 [17] 所述的动态等离子鞘套模拟装置, 建立了一套信号传输实验系统. 动态等离子鞘套模拟装置的核心是等离子发生器, 结构如图 1 所示. 其主体是一只厚度 18 cm, 直径 40 cm 的金属密封腔体, 由真空泵将内部气压抽至 10 Pa 以

下, 形成辉光放电所需的低气压环境. 放电电极采用直径 30 cm 的环形多孔电极, 与金属外壁间形成了 5 cm 左右的放电间隙. 等离子电源加在金属外壁与环形多孔电极之间, 强电场使放电间隙内的空

气电离从而产生等离子体, 再通过电极上的孔洞扩散至腔体内部, 均匀填充整个腔体空间, 从而形成一块厚度 18 cm, 直径 30 cm 的等离子体介质, 供后续电波传播实验使用.

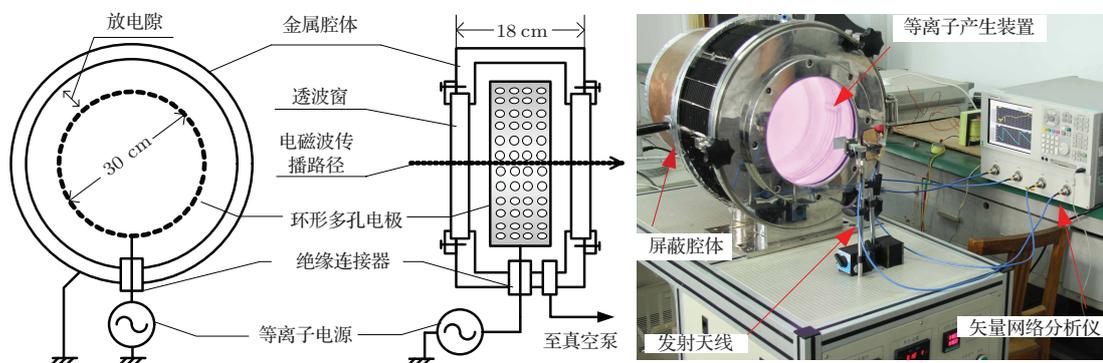


图1 等离子体产生装置

这种特殊的放电结构产生的是非磁化等离子, 且内部无电势差. 该等离子发生器内的环形多孔电极一方面提供了等离子体的扩散通道, 另一方面构成了“法拉第笼”, 在其内部形成了等势体, 从而保证其内部的等离子体内部既无磁场也无电势差, 是一种电中性的等离子体. 大多数辉光放电等离子体产生装置通常具有金属电极以及外壁, 为了让电磁波波束在穿透等离子体的过程中不受额外影响, 首先要保证约束等离子体的金属外壁大于波束主瓣宽度, 以避免波导效应; 其次要保证传播路径上无金属遮挡物. 该等离子体发生器中空结构的有效透波孔直径达到 30 cm, 便于开展各类电波传播实验, 且等离子体内无任何金属阻挡物.

路径信号. 所采用的天线为一对标准增益喇叭天线, 其频带宽度为 2.17—3.3 GHz, 驻波比小于 1.5, 中心频点处增益为 15 dB; 其主瓣波束宽度为 55°, 主瓣尺寸小于透波窗口尺寸; 发射天线距离窗口为 35 cm; 接收天线固定于屏蔽腔体内, 距离窗口约为 15 cm.

图 2 是中心电子密度随等离子源输入功率的变化实验结果. 设定腔体内气压为 10 Pa, 每一个放电功率点进行 10 次测量, 可以观测到随着放电功率的升高, 中心点电子密度变高, 变化规律基本呈线性, 并且每一功率点的重复性较好. 气压为 10 Pa 且放电功率为 2400 W 时, 中心部分的电子密度可以达到 $1.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. 且电子密度可根据加入功率不同, 实现动态控制.

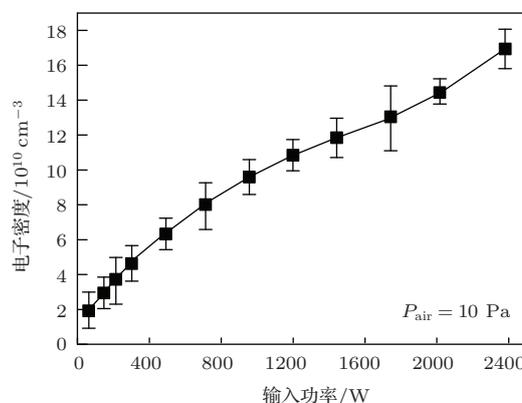


图2 电子密度随输入功率的变化

3.1.2 信号传输实验系统配置

实验系统如图 3 所示. 在实验中, 将等离子体发生器覆盖于天线窗外部, 让电磁波穿透放电腔体内部等离子体. 在接收端, 将接收天线置于屏蔽仓之内, 屏蔽层内层贴上铁氧体屏蔽材料, 降低反射、散射和绕射电磁波对测量的干扰, 使接收天线只接受来自发射天线发射、经过等离子体后到达的直射

USRP2 软件无线电平台被用作信号产生发射与接收模块. 利用软件无线电系统, 搭建通信信号传输系统, 分析研究等离子体对实际测控通信信号的影响. 软件无线电平台由射频子板、母板和天线组成, 可通过更换射频子板来选择不同的工作频段. USRP2 可以实时处理两路信号, 同时进行发射与接收, 能够进行 VHF, L, S, C 波段 (50 MHz—5.9 GHz) 的通信信号实验. 本实验采用 RFX2400 射频子板, 其频率范围为 2.3—2.9 GHz, 发射功率为 50 mW (17 dBm).

该软件无线电平台基于计算机开发, 基带信号的调制、解调、脉冲成形、载波同步、码元同步等基带信号处理步骤都在计算机上完成, 经过 USRP2 上变频后, 产生实际通信信号, 由天线发射, 经过等

离子后, 信号被接收天线接收, 下变频后, 由 USRP2 输入进计算机, 进行数据分析与解调、解码等工作, 实时地对传输数据进行记录分析. 处理过程如图 4 所示.

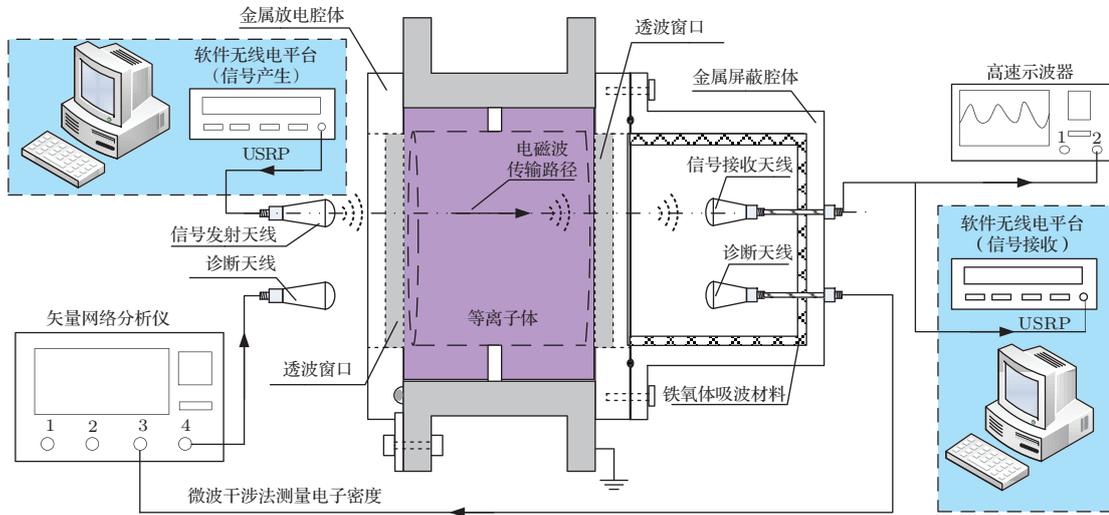


图3 通信信号传输实验系统

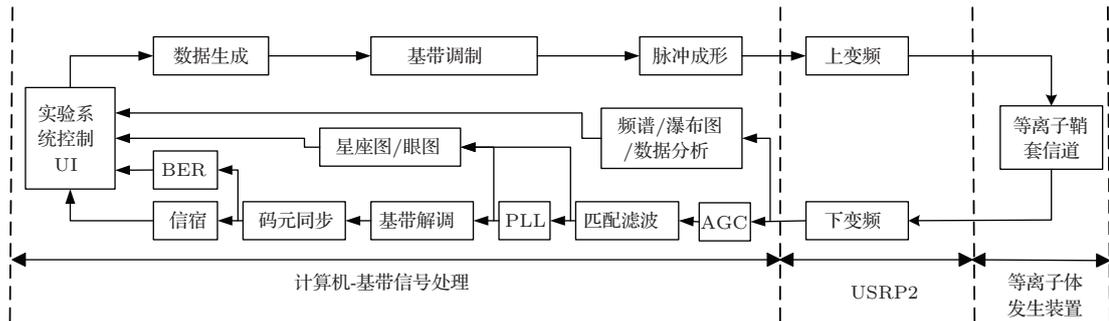


图4 信号传输过程与处理框图

从文献 [17] 中可知, 在一定气压条件下, 该装置产生的等离子体电子密度与注入的放电功率基本呈线性正比关系. 所以放电时, 通过在电极上加入时变的功率, 就可以实现时变等离子体的产生, 其变化频率与加入的功率变化频率一致. 文献 [13] 的结果显示, 鞘套的电子密度抖动频率处于 20—100 kHz 之间, 我们采用 30 kHz 中频交流放电方式, 产生 30 kHz 变化的时变等离子体. 文献 [17] 中的结果亦表明: 放电气压越低, 分子平均自由程越长, 在扩散过程中等离子复合的概率小, 得到的等离子均匀度越好; 但放电气体的气压进一步降低可电离介质变少, 会使电子密度下降; 大约 10 Pa 的放电气压能够在获得均匀分布的前提下得到足够密度的等离子体, 其均匀度好于 90% [17]. 本装置

的最大电子密度大约为 $1.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, 其截止频率约为 3.7 GHz. 所测量频率选择为 10.4 GHz. 微波干涉法测量到的相位差是弦上等离子体引起的相移的累积, 若根据公式

$$n_e \approx \frac{2\epsilon_0 m_e \omega_d c}{e^2 l} \cdot \Delta\varphi = \frac{1.185 f_d}{l} \cdot \Delta\varphi, \quad (16)$$

计算得到的电子密度即为弦平均电子密度. 电子密度为 $3.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 对应的截止频率为 1.57 GHz, 远小于测量频率 10.4 GHz. 等离子体的抖动所引起相位抖动很小. 测量时, 通过对多个周期内测量到的相移取平均, 获得电子密度时间平均值.

所以, 本文设定放电气压为 10 Pa 左右, 放电功率 0—2000 W, 交流频率为 30 kHz, 等离子体厚度 18 cm. 分别进行了单频点信号、二相相移键控 (BPSK) 信号的传输实验, 从信号的时域与频域特

征, 以及BPSK信号的星座图、眼图角度对经过等离子体后的信号特征变化进行了分析.

3.2 单载波信号在时变等离子体中的传播实验结果分析

产生一个S波段的点频信号(2.5 GHz), 通过高速示波器(采样率达40 GHz)记录接收信号的时域波形, 如图5(b)所示. 并通过与发射信号相位做差, 同时减去无等离子体时的测量系统固有相位差 11° . 获取由等离子体时变性引起的相位抖动变化时域波形, 如图5(c)所示.

通过微波干涉法测得平均电子密度为 $3.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 对应的截止频率为1.55 GHz. 并通过光强计测量等离子体光辐射的起伏变化, 如图5(a)

所示. 可以看出, 等离子体的变化周期约为 $33.3 \mu\text{s}$, 这与中频电源的周期一致. 电波穿过等离子体后的幅度与相位均出现了起伏变化, 其变化周期与等离子体的周期是一样的. 并且当等离子体光辐射最小时, 其幅度出现峰值, 相位差的最大值出现在光辐射最大时.

同时, 将信号送入频谱分析仪, 获得了经过时变等离子体后的信号功率谱, 如图6所示. 有等离子体存在的情况下, 不仅信号幅度发生衰减, 而且出现了谐振频率, 其谐振频率约为30 kHz及其倍数, 等于等离子体变化频率. 通过单频信号传输实验, 对信号的时域和频率进行分析, 证实了时变等离子体会引起电波的幅度和相位寄生调制效应, 其调制频率与等离子体变化频率一致.

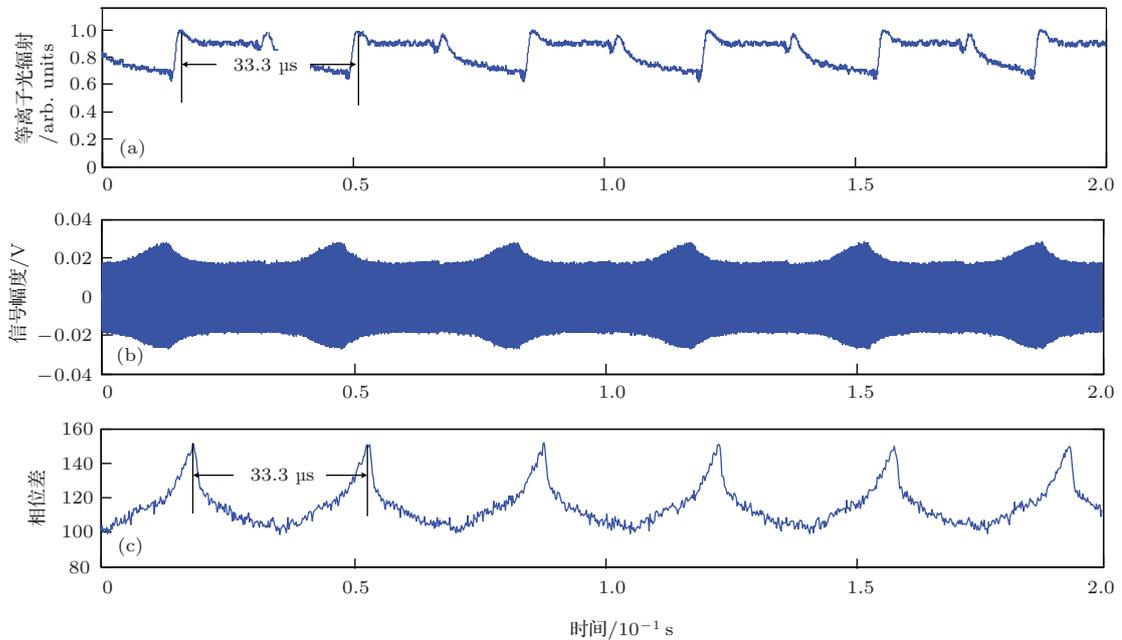


图5 时变等离子体与经过等离子体后单频信号(2.5 GHz)的时域波形 (a) 等离子体光辐射强度; (b) 接收信号幅度; (c) 接收信号与发射信号的相位差

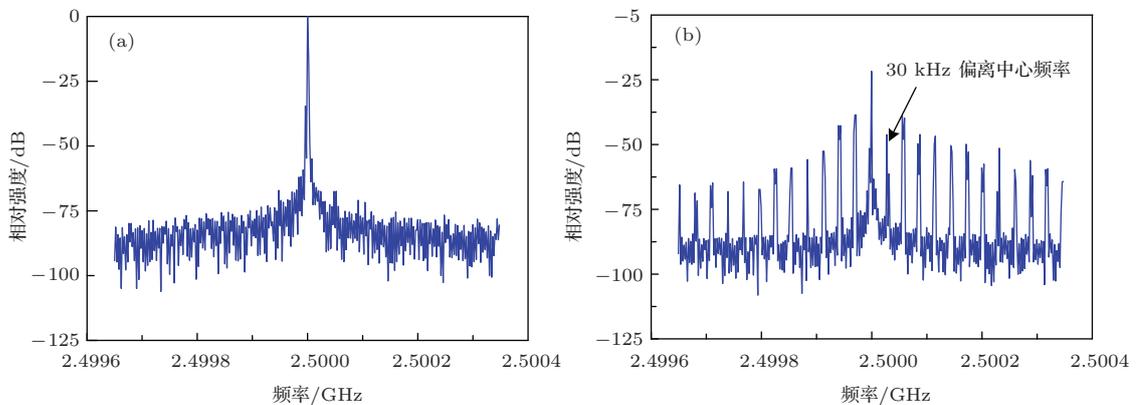


图6 单频信号(2.5 GHz)的功率谱 (a) 无等离子体时的接收信号频谱; (b) 有等离子体时的接收信号频谱

3.3 BPSK 信号在时变等离子体中的传播实验结果分析

利用 UERP2 软件无线电平台, 产生载波为 2.4 GHz, 码率为 100 kbps 的 BPSK 信号. 设定放电气压为 10 Pa, 通过调节输入功率使平均电子密度分别为 3.0×10^{10} , 4.5×10^{10} 和 $5.6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 对应的截止频率为 1.55, 1.91 和 2.12 GHz, 均低于

载波频率.

本文对经过时变等离子体后的 BPSK 信号星座图进行了测量, 如图 7 所示. 可以看出, 即使载波频率大于等离子体频率, 但随着电子密度的增加, 其入射波频率与等离子体频率越来越相近, 寄生调制效应更明显, 星座点旋转更加剧烈, 星座点间距离减小, 造成信号检测判决裕度的降低, 按照传统测控接收机检测方法仍然无法完成可靠通信.

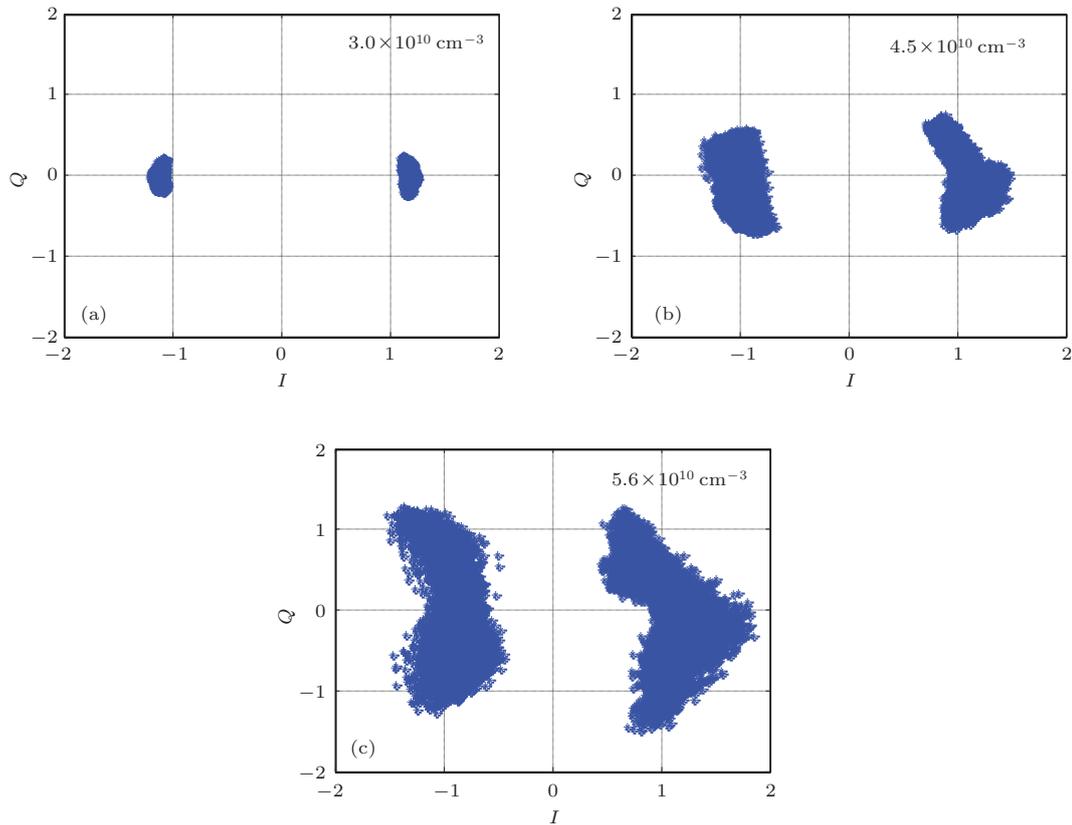


图 7 BPSK 信号经过时变等离子体后的星座图 (实验结果)

时变等离子体所引起星座点的旋转与相位噪声引起的相位旋转不同, 其旋转不仅有相位角上的旋转, 而且幅度上也因为调制效应, 发生衰减. 所以, 其星座点的模 (幅度) 与相位角有对应关系, 从 (13) 式可推导出每一个星座点的坐标为

$$\sqrt{I^2 + Q^2} = \sqrt{E_S} \exp(-\alpha(t)z), \quad (17)$$

$$\frac{I}{Q} = \tan\left((i-1)\frac{\pi}{2} - \beta(t)z\right), \quad (18)$$

(17) 式表示星座点的模, (18) 式表示星座点的相位角. 可以看到, 星座点的模和相位角变化分别由时变等离子体的衰减系数 $\alpha(t)$ 和相移系数 $\beta(t)$ 以及均匀等离子体的长度决定. 若等离子体非均匀, 则是由时变等离子体的衰减系数和相移系数在电波传

输方向上的线积分决定. 衰减系数 $\alpha(t)$ 和相移系数 $\beta(t)$ 由 (5) 和 (6) 式给出.

对于实际接收机来说, 由于存在自动增益控制 (AGC) 环节以及相位同步环节的作用, 使信号的平均幅度基本恒定, 初相基本为零. 从图 7 中可以看出, 星座点的中心基本处于 $(-1, 0)$ 和 $(1, 0)$ 点上.

与此同时, 本文参考文献 [10, 14—16] 所提到的解析仿真方法, 仿真分析了 BPSK 信号在时变等离子体产生装置中的传播过程, 并与实验结果进行对比. 按照等效波阻抗法计算垂直入射的电波信号在等离子体中传播, 设定仿真模型的等离子体电子密度与实验一样, 等离子体长度 $d = 18 \text{ cm}$, 信噪比为 30 dB; 并按照图 5 (a) 所示的电子密度时变方式

变化, 对 BPSK 信号的传输过程进行仿真, 结果如图 8 所示. 从仿真结果上可看出, 相同的等离子体起伏强度以及载波频率下, 等离子体频率越大, 相位旋转越强烈, 仿真结果与实验结果基本一致. 实验结果和仿真结果均表现出电子密度越大, 其加性随机噪声也增大的趋势. 这是因为等离子体密度增大后, 信号衰减变大, AGC 放大信号幅度的同时, 也将噪声放大, 进而使信噪比降低.

同时, 对 BPSK 信号的眼图进行测量分析. 眼图是衡量通信系统性能的一种直观图形, 从眼图中可以观察到码间串扰和噪声的影响, 从而估计系统

的优劣.

图 9 所示分别为电子密度为 0 , 3.0×10^{10} , 4.5×10^{10} 和 $5.6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 时的眼图. 表 1 对比了不同电子密度下的眼图参数. 可知, 随着等离子体密度的增加, 等离子体越来越接近于等离子体频率, 等离子体引起的衰减越来越大, 导致眼图的整体幅度越来越小. 而随着寄生调制效应的增强, 噪声越来越大, “眼睛”张开的大小越来越小, 而线迹的宽度越来越大. 这就意味着码间串扰越大, 造成误码率增加, 无法进行可靠通信.

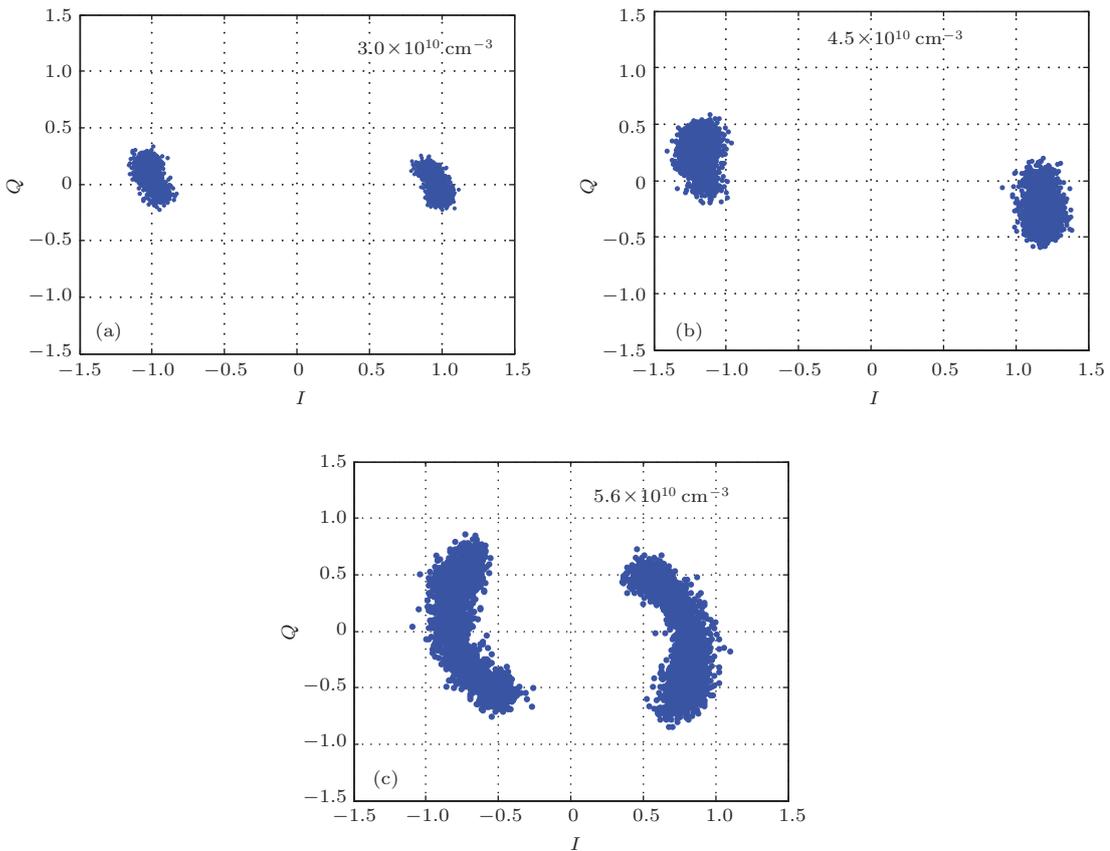


图 8 BPSK 信号经过时变等离子体后的星座图 (仿真结果)

通过实验表明: 即使载波频率大于等离子体频率, 由于时变等离子体引起的寄生幅度相位调制效应影响, 信号星座点间距离减小, 信号检测判决裕度降低, 眼图模糊, 码间串扰增加, 造成误码率的增加, 通信可靠性下降.

由此可见, 等离子体鞘套对电磁波传播的影响非常复杂, 解决黑障问题是一项系统工程. 仅仅通过提高电波频率、电磁二维窗等物理手段增加电波的透射率, 并不能完全解决等离子体鞘套带来的通信质量下降的问题. 提高载波频率与等离子体截止频率

之比, 可以一定程度上缓解时变等离子体引起的寄生调制, 但是并不能消除. 针对寄生调制效应的影响, 应采用物理手段与信号处理相结合的方法. 动态等离子体引起的调制效应在一定程度上与相位噪声引起的干扰是类似的, 都会造成信号星座图的旋转. 但是调制效应与等离子体的参数密切相关, 可以通过对等离子体电子密度及其动态变化的测量, 推算出调制效应引起的信号畸变的规律, 为信号处理提供先验知识, 消除调制效应对信号传输的干扰, 从而提高通信的可靠性.

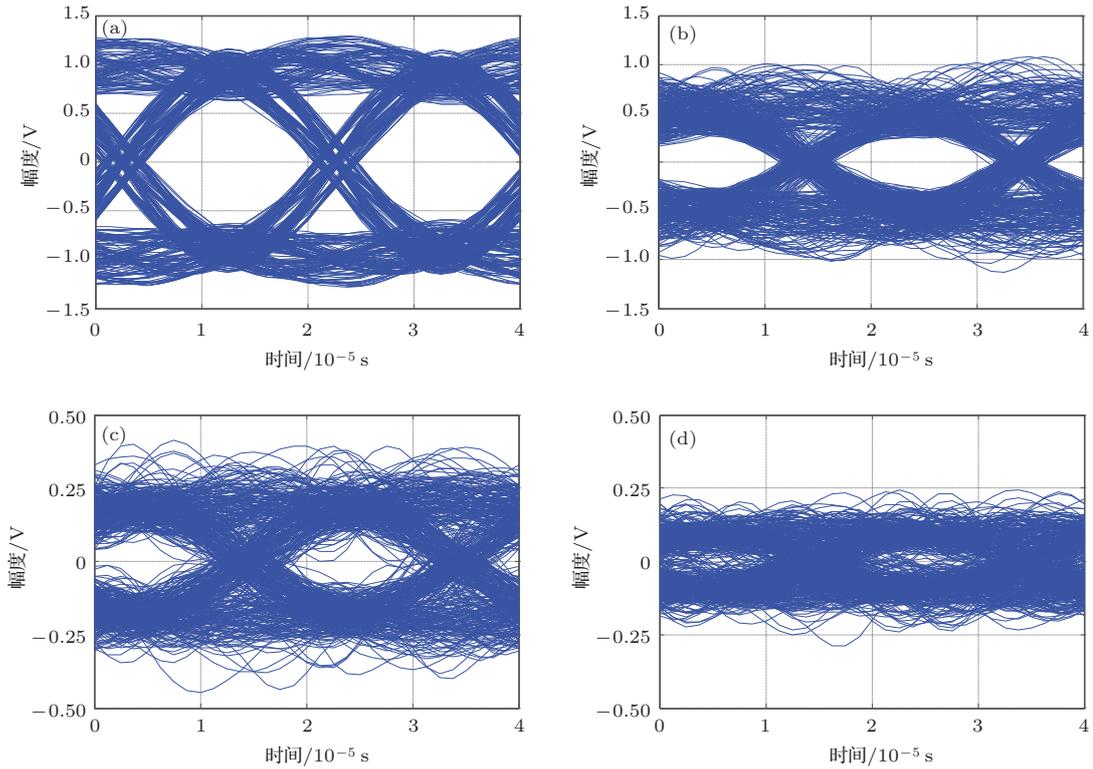


图9 BPSK信号经过时变等离子体后的眼图(实验结果) (a) $n_e = 0$; (b) $n_e = 3.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$; (c) $n_e = 4.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$; (d) $n_e = 5.6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$;

表1 眼图参数与误码率对比

电子密度/ 10^{10} cm^{-3}	眼高/ μs	眼宽/arb.units	眼幅度/arb.units	眼交叉比	误码率
0	26.7	0.9650	1.730	49.8	1.70×10^{-4}
3.0	24.1	0.1890	1.020	50.2	0.32×10^{-2}
4.5	12.4	0.0589	0.387	50.0	1.20×10^{-2}
5.6	2.2	0.0209	0.217	50.2	0.27

4 结 论

本文利用理论和实验手段分析了时变等离子体对通信信号传输的影响,证实了时变等离子体会引起电波幅度相位上的寄生调制效应,调制形式与等离子变化形式密切相关.通过S频段BPSK信号在时变等离子体中的传输实验发现,寄生调制效应会导致调相信号星座图发生旋转,信号星座点间距减小,检测判决裕度降低,从眼图上表现为眼图模糊,传输信号质量变差,进而造成误码率的上升.本文同时探讨了可能的解决途径,对深入研究“黑障”问题以及实现克服黑障通信具有一定的理论与实践价值.

参考文献

- [1] Rybak J P, Churchill R J 1971 *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst.* **7** 779
- [2] Hartunian R A, Stewart G E, Ravn O 2007 *Causes and Mitigation of Radio Frequency Blackout During Reentry of Reusable Launch Vehicles* (El Segundo: Aerosp. Corporation) p1
- [3] Potter D L 2006 *The 37th AIAA Plasma Dynamics and Lasers Conference* San Francisco, USA, June 5-8, 2006 p235
- [4] Wang B Y 1982 *J. Astronau.* **3** 81 (in Chinese) [王柏懿 1982 宇航学报 **3** 81]
- [5] Daniel G, Joseph S, Robert S 1992 *Electromagnetic Wave Propagation in Unmagnetized Plasmas* (Malibu, CA: Hughes Research Laboratories) p1
- [6] Heald C B, Wharton M A 1965 *Plasma Diagnostics with Microwaves* (1st Ed.) (New York: John Wiley & Sons) p120

- [7] Ma C G, Zhao Q, Luo X G, He G, Zheng L, Liu J W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 055201 (in Chinese) [马春光, 赵青, 罗先刚, 何果, 郑玲, 刘建卫 2011 物理学报 **60** 055201]
- [8] Zheng L, Zhao Q, Luo X G, Ma P, Liu S Z, Huang C, Xing X J, Zhang C Y, Chen X L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 155203 (in Chinese) [郑灵, 赵青, 罗先刚, 马平, 刘述章, 黄成, 邢晓俊, 张春艳, 陈旭霖 2012 物理学报 **61** 155203]
- [9] 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]
- [10] Wu R H, Liu H Y, Liu J Q, Chang Q 2013 *J. Beijing Univ. Aeronaut. Astronaut.* **18** 585 (in Chinese) [邬润辉, 刘洪艳, 刘佳琪, 常青 2013 北京航空航天大学学报 **18** 585]
- [11] Gillman E D, Foster J E, Blankson I M 2007 *Review of Leading Approaches for Mitigating Hypersonic Vehicle Communications Blackout and a Method of Ceramic Particulate Injection Via Cathode Spot Arcs for Blackout Mitigation* (Cleveland, Ohio: NASA) p8
- [12] Potter D L 2011 *The 17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference* San Francisco, USA, April 11–14, 2011 p2153
- [13] Anthony D, Richard G 1971 *AIAA J.* **8** 1533
- [14] Lin T C, Sproul L K 2006 *Comput. Fluids* **35** 703
- [15] Shawn G O, Brian E G, Ferguson S D 1999 *IEEE Tran. Plasma Sci.* **27** 587
- [16] Yang M, Li X P, Xie K, Liu Y M, Shi L 2013 *J. Astronaut.* **34** 842 (in Chinese) [杨敏, 李小平, 谢楷, 刘彦明, 石磊 2013 宇航学报 **34** 842]
- [17] Yang M, Li X P, Xie K, Liu Y M, Liu D L 2013 *Phys. Plasmas* **20** 1
- [18] Zhu B, Yang J, Huang X G, Mao G W, Liu J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2352 (in Chinese) [朱冰, 杨娟, 黄学刚, 毛根旺, 刘俊平 2006 物理学报 **55** 2352]
- [19] Wang L, Cao J X, Wang Y, Niu T Y, Wang K, Zhu Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1429 (in Chinese) [王亮, 曹金祥, 王艳, 牛田野, 王舸, 朱颖 2007 物理学报 **56** 1429]

Propagation of electromagnetic signals in the time-varying plasma*

Yang Min[†] Li Xiao-Ping Liu Yan-Ming Shi Lei Xie Kai

(School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 22 August 2013; revised manuscript received 16 December 2013)

Abstract

Because the boundary layer of the plasma sheath formed around the hypersonic vehicle flying in atmosphere is turbulent, the parameters of plasma sheath, such as the electron density, become time-varying. Both the amplitude and phase of electromagnetic (EM) signal are modulated by the time-varying plasma. By using a large volume uniform plasma generator, an experimental system for the propagation of EM signals in the time-varying plasma is built. The propagation experiment of the monochromatic signals and binary phase shift keying signals in S band of plasma is conducted. The modulations of the amplitude and phase of EM signal are proved, and the rotation of constellation of the multiple phase shift keying (MPSK) signal is observed. The experimental and simulation results demonstrate that the frequency of parasitic modulation is the same as that of time-varying plasma and the parasitical modulation intensity varies in proportion to the ratio of the electron density profile to the carrier frequency. Even if the carrier frequency is higher than the plasma frequency, the parasitical modulation will make the constellation of the MPSK signals circumsolve, and the bit error rate higher.

Keywords: time-varying plasma, electromagnetic wave propagation, parasitical modulation, plasma generation

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

DOI: 10.7498/aps.63.085201

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2014CB340205), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 613001173), and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. K72125087).

[†] Corresponding author. E-mail: merovingia1911@126.com