

关于等离子体隐形技术的浅析

宣读人： 张磊

PB01009032

一、引言

所谓等离子体的隐形技术，就是通过电磁波与等离子体的相互作用，利用等离子体对电磁波的反射、折射、吸收、变频等，将电磁波能量衰减，改变电磁波的传播相角，甚至是电磁波产生绕射，从而达到隐形效果。

本文在理论上从等离子体对电磁波功率的吸收作用方面进行探讨、分析。所取的电磁波频段为现役雷达的频率范围（0.5~10GHz），等离子体中的电子与中性气体的碰撞频率为0.1GHz~10GHz。

二、电磁波与均匀非磁化等离子体的相互作用

1. 基本理论

首先给出电磁波在均匀非磁化等离子体中的麦克斯韦方程组

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (1) \quad D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad B = \mu_0 H \quad (3)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (4)$$

对方程组中式（2）求旋度，并利用式（4）得：

$$\begin{aligned}\nabla \times (\nabla \times E) &= -\nabla \times \frac{\partial B}{\partial t} = -\frac{\partial (\nabla \times B)}{\partial t} = -\mu_0 \frac{\partial (\nabla \times H)}{\partial t} \\ &= -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial D}{\partial t} \right) = -\epsilon_0 \mu_0 \epsilon_r \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}\end{aligned}$$

$\nabla \cdot E = 0$

利用矢量分析式，并考虑 $\nabla \cdot E = 0$ ，得

$$\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla \cdot (\nabla \times E) - \nabla^2 E = -\nabla^2 E$$

$\therefore$ 可得到电磁波在均匀非磁化等离子体中的传播方程

$$\nabla^2 = \epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (5)$$

由于电磁波的一般解 都可以用平面波分量的傅立叶积分来展开, 这里仅以平面电磁波与等离子体的相互作用为例, 假设电磁波沿X轴正向传播, 则:

$$E = E_0 \exp\{j\omega t - \tilde{r}x\} \quad j \equiv \sqrt{-1} \quad (6)$$

式中 ω 为电磁波的角频率; $\tilde{r}$ 为传播常数, 有式 (5) 和式 (6) 可解出电磁波在均匀非磁化等离子体中的色散关系为:

$$\tilde{r} = -\frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r \quad c \text{ 为光速} \quad (7)$$

由传播常数

$$\tilde{r} = j \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_r} = \alpha + j\beta \quad (8)$$

得:

$$\alpha = -\frac{\omega}{c} I_m \left(\sqrt{\epsilon_r} \right) \quad (9)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} R_e \left(\sqrt{\epsilon_r} \right) \quad (10)$$

上式中 α 为衰减系数； β 为相位常数。

下面分析等离子体的介电常数 ϵ_r ：

由于在等离子体中，中性气体的密度远大于等离子体密度，因此可以忽略电子与离子的碰撞，另外离子的质量远大于电子的质量，可以忽略其运动，仅考虑电子的运动。

对于一团电子气来说，电子的移动相当于产生一个极化强度 P ，它等于单位体积中的电偶极矩：

$$P = -ner = \chi E \quad (11)$$

式中 χ 为电极化率，现在要求 r 和 E 的关系，故引用郎之万方程： $(\nu_{en}$ 为电子与中性气体的碰撞频率)

$$m_e \ddot{r} + m_e \nu_{en} \dot{r} = -eE \quad (12)$$

$$\therefore \frac{\partial r}{\partial t} = -i\omega \quad \omega \text{ 为电磁波频率}$$

$$\therefore -\omega^2 r - j\omega \nu_{en} r = -\frac{e}{m_e} E \quad (13)$$

$$\text{得} \quad r = \frac{e}{m_e \omega (\omega + j \nu_{en})} E \quad (14)$$

将式 (14) 代入式 (11) 得

$$\chi = - \frac{ne^2}{m_e \omega (\omega + j \nu_{en})} \quad (15)$$

而有等离子体频率:

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi ne^2}{m_e}$$

$$\therefore \quad \varepsilon_r = 1 + 4\pi\chi \quad (16)$$

$$\therefore \quad \varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} + j \frac{\omega_p^2 \nu_{en} / \omega}{\omega^2 + \nu_{en}^2} \quad (17)$$

假设电磁波在真空中的传播功率为 P_0 ，经真空与等离子体界面进入到等离子体内的功率为 P_i ，被界面反射的功率为 P_r 。由于均匀等离子体的密度不变，对于一定频率的入射波，介电常数不变，因此在等离子体内部不存在反射。

电磁波在交界面上的反射功率满足下式：

$$\frac{P_r}{P_0} = \left| \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \right|^2 \quad (18)$$

通过界面进入等离子体介质内的电磁波功率为：

$$P_i = P_0 - P_r \quad (19)$$

传播到任一位置 x 的波的功率为：

$$P(x) = P_i \exp\{-2\alpha x\} \quad (20)$$

假设等离子体厚度为 d ，则电磁波经等离子体衰变后在 $x = d$ 处透射出去的功率：

$$P_t = P_i \exp \{-2\alpha d\} \quad (21)$$

因此电磁波被等离子体吸收的功率为：

$$P_a = P_0 - P_r - P_t \quad (22)$$

计算参数:

电磁波频率在现役雷达工作频段中取值
($f_m = 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0 \text{GHz}$);

等离子体密度取 $n_e = 10^{10} \text{cm}^{-3}, 10^{11} \text{cm}^{-3}$,
即 $f_p = 0.9, 2.8 \text{GHz}$;

碰撞频率取 $f_{en} = 0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 \text{GHz}$;

等离子体厚度取 $d = 10 \text{cm}$

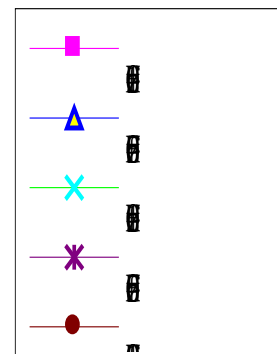
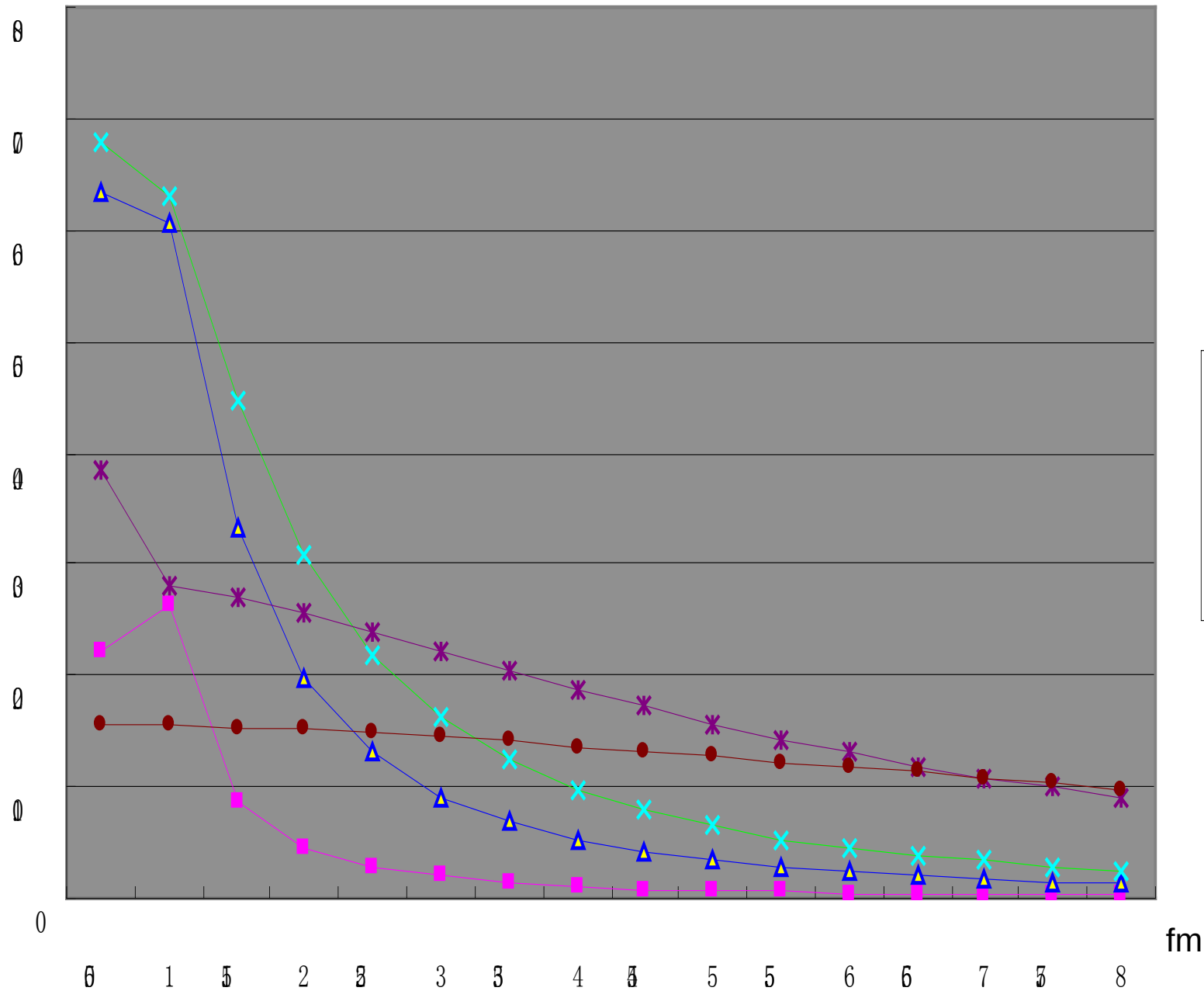

```

void math()
{
    int i,j,k;
    float a,b,x,y,af,t,Pr,Pt,Pa;
    for(i=0;i<2;i++)
        for(k=0;k<5;k++)
            for (j=0;j<9;j++)
            {
                a=1-fp[i]*fp[i]/(fm[j]*fm[j]+fe[k]*fe[k]);
                b=fp[i]*fp[i]*fe[k]/fm[j]/(fm[j]*fm[j]+fe[k]*fe[k]);
                x=sqrt((sqrt(a*a+b*b)+a)/2);
                y=b/2/x;
                af=y*fm[j]*2*3.1415726*10/3;
                t=1/exp(2*af*0.1);
                Pr=((1-x)*(1-x)+y*y)/((1+x)*(1+x)+y*y);
                Pt=(1-Pr)*t;
                Pa=1-Pr-Pt;
                printf("fp=%-15f fe=%-15f fm=%f\n",fp[i],fe[k],fm[j]);
                printf("E=%-10f+%10fi saqt(E)=%-10f+%10fi Af=%-10f \n",a,b,x,y,af);
                printf("Pr/Po=%-15f Pt/Po=%-15f Pa/Po=%-15f",Pr,Pt,Pa);
                printf("\n");
                return;
            }
}

```

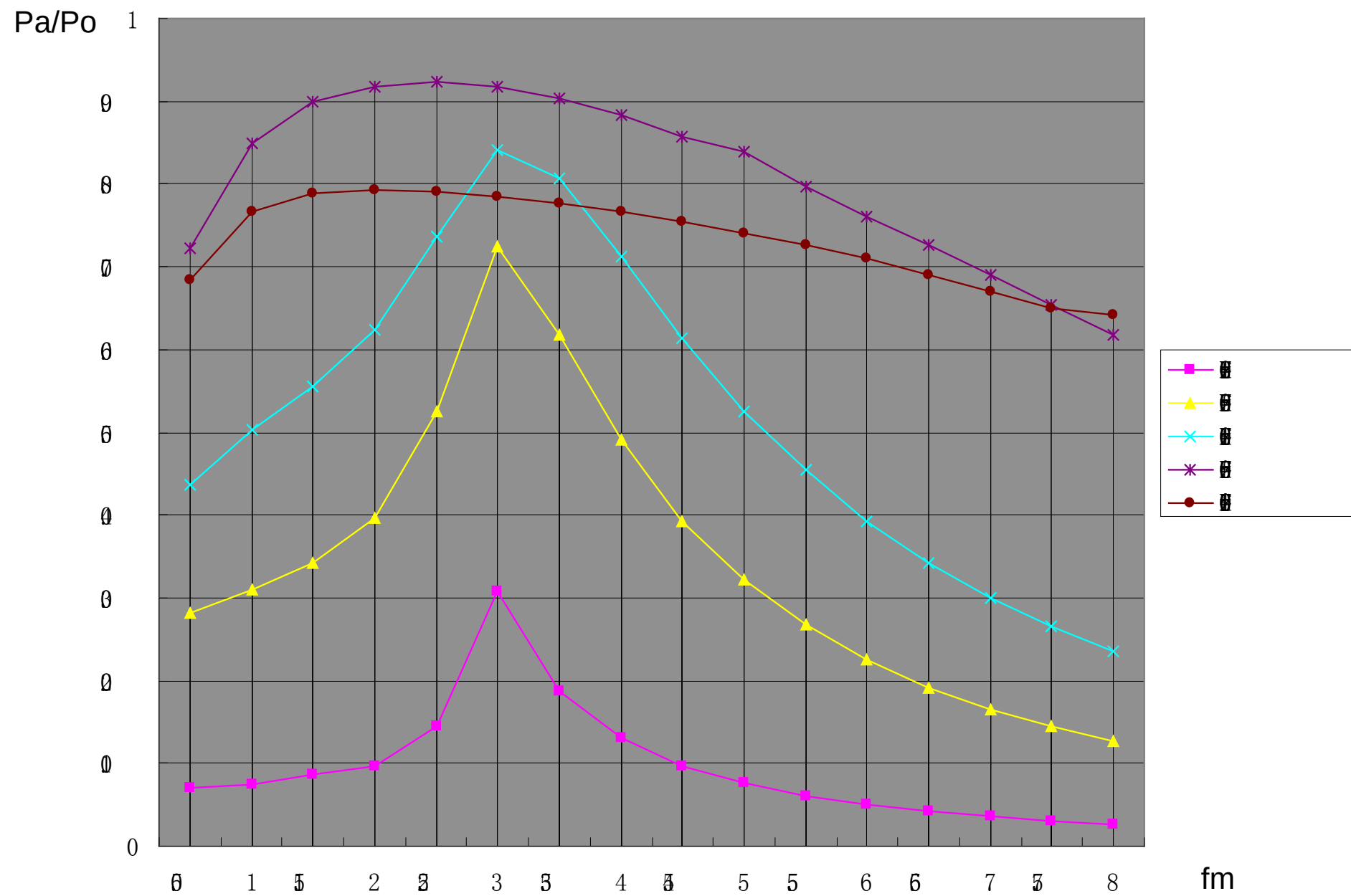

fp=0.9GHz时电磁波的吸收图

Pa/Po



fm

fp=2.8GHz时电磁波吸收图



分析

- 1.当电磁波频率接近等离子体频率时，吸收频率趋于峰值，这是因为电磁波与等离子体发生共振，电磁波加强了等离子体电子的振荡，电子吸收了较多的电磁波能量。
- 2.当电磁波频率、等离子体频率和碰撞频率都接近时（图一的 $f_{en}=0.5$ 、 1.0GHz 和图二的 $f_{en}=1.0$ 、 5.0GHz 曲线的峰值点），吸收功率存在较大的峰值。这是因为两种共振（电子振荡和碰撞）同时发生，吸收的电磁波能量最多。
- 3.吸收功率随等离子体密度的增大而增大，这是由于等离子体密度越大，参与碰撞的电子越多，吸收的电磁波也就越多。
- 4.当 $n=10^{11}\text{cm}^3$ ，即 $f_p=2.8\text{GHz}$ 时，且碰撞频率较高时（ $f_{en}=5.0$ 、 10.0GHz ，尤其 $f_{en}=5.0\text{GHz}$ ），吸收功率在这个雷达范围内都比较大，吸收比例最高可达90%以上，很理想。
- 5.此外，可以发现：反射频率随等离子体密度的增大而增大，随电磁波频率的升高而减少，随碰撞频率的升高而减少；透射频率则随等离子体的增大而减少，随电磁波频率的升高而增大。

结论:

当等离子体密度比较大时，电子与中性气体的碰撞频率比较大时，可以有很好的隐形效果，最高可超过90%。

参考书目:

- 1、等离子体物理学导论 F•F•CHEN
中国科学技术大学(四系教材)
- 2、电磁波在等离子体中的传播 [苏]:B•JI•金兹堡
科学出版社
- 3、等离子体物理原理 马腾才、胡希伟、陈银华著
中国科学技术大学出版社1988
- 4、电磁场与电磁波 谢处方、饶克谨著
高等教育出版社1999.6月第二版
- 5、电磁波与等离子体的相互作用
孙爱萍、李丽琼、邱孝明、董玉英著
- 6、电磁场、电磁能和电磁波 [美]:L•M•玛奇德著
高等教育出版社1882.12月第一版
- 7、未来制造业和加工也中的等离子体 邱孝明

谢谢！