

吸收型箔条云对雷达波的干扰效能

羊劲衡, 王 星, 陈 游, 周一鹏, 赵 玉

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

摘要 研究了吸收型箔条云对雷达波的干扰效能。借鉴高斯在处理通量问题的思路,把吸波体的整个体积作为研究对象,分析吸收型箔条云对雷达波的干扰机制;然后根据电磁波传输线理论和能量守恒原理,建立吸波体表面透射损耗和反射损耗模型;最后结合雷达方程,分析雷达从发射电磁波到接收目标回波的具体过程,建立了回波功率衰减模型,得到干扰后的雷达最大作用距离变化情况。仿真结果显示,随着频率的升高,功率衰减系数总体呈上升趋势,在厚度仅为 100 m 时,衰减最大能达到 23.4 dB,衰减在 8.7 dB 以上频宽为 11 GHz,占整个频段的 64.7%。因此吸收型箔条云对雷达波有明显的衰减作用,具有一定的战场应用价值。

关键词 吸收型箔条云;干扰效能;透射损耗;反射损耗;功率衰减

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.03.009

中图分类号 TN97 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)03-0049-05

Research on Jamming Performance of Absorptive Chaff Cloud on Radar Wave

YANG Jinheng, WANG Xing, CHEN You, ZHOU Yipeng, ZHAO Yu

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Absorptive chaff is a kind of light and high-efficiency passive jamming material. Through making echo amplitude scattered heavily in the air received by enemy equipment in detecting fallen, this can reduce the probability of being found and tracked by radar equipment. This paper studies the jamming performance of absorptive chaff cloud on radar wave. First, combined the existing research results, the jamming mechanism of absorptive chaff cloud on radar wave is analyzed. Then, according to the transmission-line theory and energy conservation principles, models of reflection loss and transmission loss on the surface of absorber are built. Finally, a power attenuation model is built, and radar maximum range changes after interference is obtained. The simulation results show that the absorptive chaff cloud has obvious weak effect on radar wave. With 100 meters' thickness, the attenuation can reach 23.4 dB. When attenuation is greater than 8.7 dB, the bandwidth can be 11 GHz, which is 64.7 percent of the entire bandwidth. Therefore, absorptive chaff cloud has obvious weaken effect on radar wave, and this has some value of application in the battleground.

Key words: absorptive chaff cloud; jamming performance; transmission loss; reflection loss; power attenuation

收稿日期: 2017-11-23

基金项目: 航空科学基金(20152096019)

作者简介: 羊劲衡(1994—),男,四川崇州人,硕士生,主要从事无源电子对抗研究. E-mail: kellyyoung331@163.com

引用格式: 羊劲衡,王星,陈游,等.吸收型箔条云对雷达波的干扰效能[J].空军工程大学学报(自然科学版),2018,19(3):49-53. YANG Jinheng, WANG Xing, CHEN You, et al. Research on Jamming Performance of Absorptive Chaff Cloud on Radar Wave[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(3): 49-53.

投放箔条干扰物对抗雷达制导武器是无源干扰的重要组成部分^[1-2]。传统箔条干扰的实质是在交变电磁场的作用下,箔条上感应交变电流产生二次辐射,从而对雷达起到无源干扰作用。随着现代电子信息技术飞速进步,各种新体制雷达及先进制导武器等精度和性能大大提高,仅靠传统箔条的无源干扰在作战中会表现出以下局限性^[3]:①实施干扰时需要对敌方雷达波进行预估判断,先验知识不足可能导致箔条无法正常发挥其效能;②传统箔条形成假目标容易被新体制雷达识别(如MTI、变极化等),难以达到预期效果;③实施质心干扰时要求箔条云散射回波和目标均在同一单元脉冲体积中。因此,研究一种实用、低廉的新型吸收型箔条来对抗敌雷达波具有很现实的意义。

吸收型箔条是一种轻质、高效的新型无源干扰材料,通过大量散布在空中使敌方探测设备接收到的回波幅度下降,从而降低被雷达设备发现和跟踪的几率。目前,相关领域已经逐步开始了对吸收型箔条的研究:文献[3]分析了吸收型箔条的干扰机理,并运用湿化学法制备了一种新型吸波型干扰材料,但没有针对特定场景或特定目标进行干扰效能分析;文献[4]仅仅给出了具有有限电导率的单根干扰纤维散射、吸收和衰减截面积表达式,限制条件太多,通用性不强;文献[5]分析了铁纤维吸波材料的雷达反射特性,没有考虑到其在吸收型箔条上的应用;文献[6]只对传统箔条形成的干扰走廊建立了雷达电磁信号的信号功率衰减模型,而针对吸收型箔条并未进行相关研究。对于以上文献中的不足,本文在分析了吸收型箔条云的干扰机理的同时,推导了对雷达波干扰时的作用过程,对其战场应用进行了初步探讨。

1 吸收型箔条云作用机理推导

吸收型箔条云可以吸收入射电磁波,从而衰减目标回波,减少目标信息特征,降低敌方对目标的发现概率。因其干扰机理为吸收衰减,而不是谐振散射或反射,对于先验知识的判断要求比传统箔条低。在实际应用中,可根据作战对象或作战目的对吸收型箔条采取不同的战术使用方法,既能单独使用,形成吸收型干扰走廊,又能配合传统箔条,形成优势互补,发挥更佳的干扰效能。

电磁波在吸波体中的传输非常复杂,包含吸收、衍射、绕射和反射等,其中吸波体对电磁波的吸收包含电损耗和磁损耗,涉及的损耗机制目前尚不清楚。本文借鉴高斯在处理通量问题的思路,即把吸波体

的整个体积作为研究对象,从宏观上把握微观上的问题,避免了电磁波在吸波体传输机制不明的问题。根据能量守恒原理^{[7]279-285},整个体积能量的流入、流出关系可以通过吸波体的外表面来分析。

吸收型箔条在空气中的分布从微观上看是非均匀的;从宏观上看,又可视作各向同性材料^[3]。如图1所示,入射电磁波(场强为 E^+)投射入吸波体,将会在 $z=0$ 和 $z=-d$ 边界处分别产生沿 z 和 $-z$ 方向传播的波,即吸波体透射波(E_{t0})和反射波(E_{r0}),它们的场强值分别为 $T_c E^+$ 和 $R_c E^+$,其中 T_c 称为透射损耗, R_c 称为反射损耗,图中省略号表示电磁波在吸波体中复杂的传输过程。

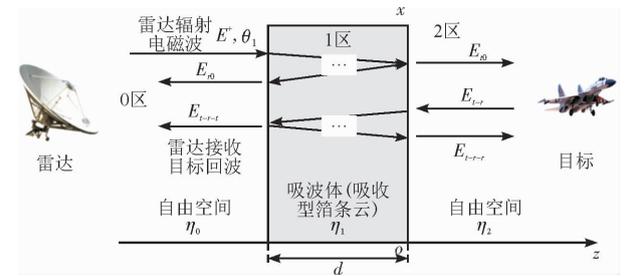


图1 吸收型箔条云对雷达波干扰示意图

Fig. 1 Schematic diagram of absorptive chaff cloud interfering radar wave

下面以透射损耗的推导过程为例。

根据电磁波的传输线理论^{[8]235-248}可得:

$$E_{t0} = E^+ T_{01} T_{12} e^{-\gamma_1 d} + E^+ T_{01} T_{12} e^{-\gamma_1 d} R_{12} R_{10} e^{-2\gamma_1 d} + E^+ T_{01} T_{12} e^{-\gamma_1 d} (R_{12} R_{10} e^{-2\gamma_1 d})^2 + \dots + E^+ T_{01} T_{12} e^{-\gamma_1 d} (R_{12} R_{10} e^{-2\gamma_1 d})^{n-1} \quad (1)$$

式中: d 为吸波体厚度; γ_1 为吸波体的复传输常数; R_{ij} 和 t_{ij} ($i, j=0, 1, 2$)分别为反射系数和透射系数,表明电磁波从 i 区入射到 j 区与 i 区边界时,在 i 区产生反射波并在 j 区产生透射波,并有:

$$\gamma_1 = j\omega \sqrt{\mu_c \epsilon_c} \quad (2)$$

$$\begin{cases} r_{ij} = \frac{\eta_i - \eta_j}{\eta_i + \eta_j} \\ T_{ij} = \frac{2\eta_j}{\eta_i + \eta_j} \end{cases} \quad (3)$$

复传输常数 γ_1 实部称为衰减常数,虚部为相移常数,式(3)中 η_i, η_j 表示吸波体的特性阻抗($i, j=1, 2$), ϵ_c 和 μ_c 分别为吸波体的等效介电常数和等效磁导率^[9],统称为等效电磁参数,它们直接影响了吸波体的吸波性能。

根据有效媒质理论(Effective Medium Theory)^[10],对某2组分复合材料,假定组分1(填充材料)和组分2(基体)对材料的贡献等效,则等效电磁参数可由各分组的电磁参数及相应的体积分算

出,吸收型箔条云可以看作是以空气为基体,以箔条为填充材料的吸波体,箔条体积分数为:

$$\theta_1 = nV_s \quad (4)$$

式中: n 为单位体积内箔条数量,即浓度; V_s 表示单根箔条体积。

根据 Looyenga 公式^[11],吸收型箔条云的等效电磁参数可表示为:

$$\begin{cases} \mu_c^{1/3} = \theta_1 \mu_1^{1/3} + (1 - \theta_1) \mu_0^{1/3} \\ \epsilon_c^{1/3} = \theta_1 \epsilon_1^{1/3} + (1 - \theta_1) \epsilon_0^{1/3} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ϵ_0 和 μ_0 为自由空间的电磁参数; ϵ_1 和 μ_1 为吸收型干扰材料的电磁参数。

由式(1)可得透射波的场强总值为:

$$\begin{aligned} E_{t0} &= T_c E^+ = \\ T_{01} T_{12} e^{-\gamma_1 d} &\left(1 + \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{n-1} (R_{12} R_{10} e^{-2\gamma_1 d})^i\right) E^+ = \\ T_{01} T_{11} e^{-\gamma_1 d} &\left(\sum_{i=0}^{\infty} (R_{12} R_{10} e^{-2\gamma_1 d})^i\right) E^+ \end{aligned} \quad (6)$$

考虑到 $R_{12} R_{10} < 1$,因此透射损耗为:

$$T_c = \frac{T_{01} T_{12} e^{-\gamma_1 d}}{1 - R_{12} R_{10} e^{-2\gamma_1 d}} \quad (7)$$

同理,反射损耗也能通过相似的方法求出:

$$R_c = \frac{E_{r0}}{E^+} = R_{01} + \frac{T_{01} T_{10} R_{12} e^{-2\gamma_1 d}}{1 - R_{12} R_{10} e^{-2\gamma_1 d}} \quad (8)$$

通常,功率透射损耗和反射损耗均用分贝值表示,即:

$$\begin{cases} T_c' = 20 \lg |T_c| \\ R_c' = 20 \lg |R_c| \end{cases} \quad (9)$$

2 对雷达波干扰分析

2.1 单基地雷达方程

根据雷达原理^[12-13],理想无损耗,自由空间下单基地雷达接收的目标回波功率可用下式表示:

$$P_r = \frac{P_t G_t \sigma A_e}{(4\pi R^2)^2} \quad (10)$$

式中: P_t 为雷达辐射功率; G_t 为雷达天线增益; A_e 为雷达天线的有效孔径; σ 为目标雷达散射截面积; R 为雷达天线与目标的距离。特别的,当同一天线兼做发射和接收时,发射增益 G_t 和有效孔径 A_e 存在如下关系:

$$A_e = \frac{G_t \lambda^2}{4\pi} \quad (11)$$

2.2 雷达波在干扰下的功率衰减

雷达从发射电磁波到接收目标回波的具体过程如下:

1) 雷达辐射电磁波(场强为 E^+)投射入干扰云后,于 $z = -d$ 处产生箔条云反射回波 E_{r0} ,在 $z = 0$

处产生箔条云透射波 E_{t0} ,其表达式分别为:

$$\begin{cases} E_{r0} = E^+ R_c \\ E_{t0} = E^+ T_c \end{cases} \quad (12)$$

2) 透射波 E_{t0} 在目标表面形成散射,一部分散射回波 E_{t-r} 再次投射入箔条云,形成雷达接收目标回波 E_{t-r-r} 和箔条云反射波 E_{t-r-r} ,分别为:

$$\begin{cases} E_{t-r-r-r} = E_{t-r} R_c \\ E_{t-r-r-t} = E_{t-r} T_c \end{cases} \quad (13)$$

目标形成的散射回波功率为:

$$P_{t-r} = \frac{P_t G_t T_c^2 \sigma}{4\pi R^2} \quad (14)$$

再次入射箔条云并由雷达接收,其功率为:

$$P_{t-r-r0} = P_{t-r} T_c^2 \frac{A_e}{4\pi R^2} \quad (15)$$

通常情况下,干扰走廊覆盖范围非常广,且目标与箔条云的距离 $R_1 \ll R_0$,因此认为目标散射回波全部入射到箔条云中。首次由目标散射回波在 $z = 0$ 处形成的反射波再次照射到目标身上并发生散射,该散射波透过箔条云后被雷达接收,其接收功率为:

$$P_{t-r-r-1} = P_{t-r} R_c^2 \frac{\sigma}{4\pi R_1^2} T_c^2 \frac{A_e}{4\pi R^2} \quad (16)$$

3) 反射波 E_{t-r-r} 继续重复过程2),每次形成的2区反射波将进入下一次循环,而在0区形成的透射波,即目标回波将会叠加并由雷达天线接收,因此:

$$P_{t-r-r-N} = P_{t-r} T_c^2 \frac{A_e}{4\pi R^2} \left(\frac{R_c^2 \sigma}{4\pi R_1^2}\right)^N, \quad N=0,1,\dots \quad (17)$$

式中: d_1 为目标与干扰云的距离; N 表示目标的散射回波在 $z = 0$ 处产生第 N 次反射。

4) 最终雷达接收到的电磁波将由第1次入射时形成的反射回波 E_{r0} 和叠加产生的目标回波 $E_{\Sigma r}$ 组成,其功率表达式为 $P_r' = P_{r0} + P_{\Sigma r}$,由式(12)~(17)可得:

$$\begin{cases} P_{r0} = \frac{P_t G_t^2 R_c^2 \lambda^2}{(4\pi R^2)^2} \\ P_{\Sigma r} = \lim_{N \rightarrow \infty} (P_{t-r-r-0} + P_{t-r-r-1} + \dots + P_{t-r-r-N}) = \\ \frac{P_{t-r} T_c^2 A_e}{\left(1 - \frac{R_c^2 \sigma}{4\pi R_1^2}\right) 4\pi R^2} \end{cases} \quad (18)$$

式中: R_0 为雷达与箔条云距离; σ_0 为箔条云等效雷达截面积。

综上所述,由式(11)、式(14)及式(18)可得,雷达接收回波功率为:

$$P_r' = \frac{P_t G_t^2 R_c^2 \lambda^2}{(4\pi R^2)^2} + \frac{P_t G_t^2 T_c^4 \lambda^2 \sigma}{\left(1 - \frac{R_c^2 \sigma}{4\pi R_1^2}\right) (4\pi)^3 R^4} \quad (19)$$

由式(10)和式(19)可得,目标回波功率 P_r 和受到箔条云干扰时回波功率 P_r' 有如下关系:

$$\frac{P_r}{P_r'} = \frac{\sigma}{4\pi R_C^2 + \frac{T_C^4 \sigma}{1 - \frac{R_C^2 \sigma}{4\pi R_1^2}}} \quad (20)$$

2.3 雷达最大作用距离衰减

在式(19)中,若令 $P_r' = S_{\min}$,即雷达接收机的灵敏度,那么 $R = R'_{\max}$,即在吸收型箔条云干扰下的雷达最大作用距离,有:

$$R'_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_i G_i^2 \lambda^2}{S_{\min} (4\pi)^3 (4\pi R_C^2 + \frac{T_C^4 \sigma}{1 - \frac{R_C^2 \sigma}{4\pi R_1^2}})}} \quad (21)$$

为更加直观地描述吸收型箔条云对雷达最大作用距离的影响,定义衰减系数 L 为:

$$L = 10 \lg \frac{P_r}{P_r'} \quad (22)$$

因 $L = 2\beta R$, β (dB/km) 为平均衰减系数,则:

$$P_r' = P_r e^{-0.115\beta R} \quad (23)$$

存在吸收型箔条云的衰减,接收到的功率也随之降低,因而作用距离也必然缩短,此时雷达的最大作用距离为:

$$R'_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_i G_i^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 S_{\min}}} e^{-0.029\beta R'_{\max}} \quad (24)$$

式中: $e^{-0.029\beta R'_{\max}}$ 称为衰减因子。

3 仿真分析

不考虑大气衰减时,根据式(1)~(9),吸收型箔条云功率透射损耗与功率反射损耗见图2。由图2可知,随着厚度的增加,透射损耗呈现线性减小趋势,反射损耗在 $-91 \sim -73$ dB 间发生周期性的振荡,该振荡是由沿入射方向的2个表面反射的电磁波相互干涉引起的^[14],与箔条云中吸波材料的浓度及入射波频率有关,振荡随着厚度增大逐渐减弱直至消失,反射损耗趋于比较稳定的 -78 dB 左右。显然反射损耗的值非常小,且比透射损耗小了3个数量级,进一步说明了吸收型箔条云的干扰机理是以吸收为主,而对雷达波的散射作用很小。

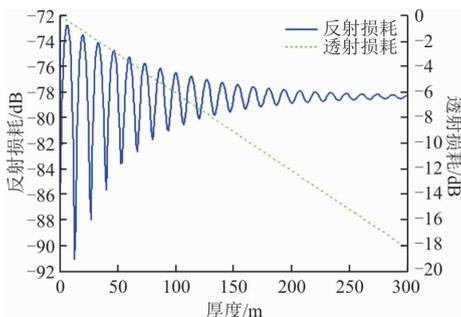


图2 反射损耗和透射损耗

Fig. 2 Reflection loss and transmission loss

RCS取典型值 10 m^2 ,箔条云厚度分别取 100 m , 200 m 和 300 m ,体积分数为 1.2×10^{-4} ,得到衰减系数频率特性曲线,见图3。

图3表明随着频率的升高,功率衰减系数总体呈上升趋势,相比低频部分,总体高频部分的干扰效果更加明显, $1 \sim 7 \text{ GHz}$ 频段上升较为明显, $7 \sim 18 \text{ GHz}$ 波段虽然也在上升,但带有一定程度的波动。另一方面,箔条云厚度对衰减系数的影响也很直观,随厚度的增大,衰减系数相对频率的变化率逐渐升高,且厚度仅 100 m 时衰减的最大值就可达到 23.4 dB ,衰减在 8.7 dB 以上频宽为 11 GHz ,占整个频段的 64.7% 。

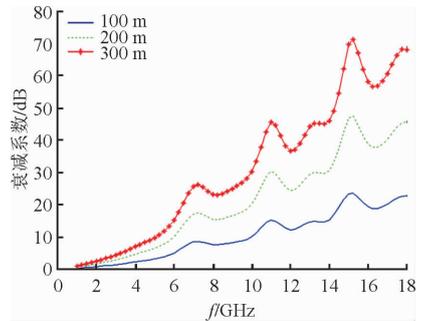


图3 衰减系数频率特性曲线

Fig. 3 Frequency characteristic curve of attenuation coefficient

图4为不同的平均衰减系数对雷达最大作用距离的影响情况,纵轴表示无干扰时的雷达最大作用距离 R_{\max} ,横轴表示有干扰时的雷达最大作用距离 R'_{\max} ,将平均衰减系数 β 作为参变量。可以看出,不同的平均衰减系数对应着不同的指数曲线,且随着平均衰减系数的增加,曲线的变化率也随之增大。当通过衰减模型计算出平均衰减系数时,可直接根据此图粗略估计干扰后的雷达最大作用距离。

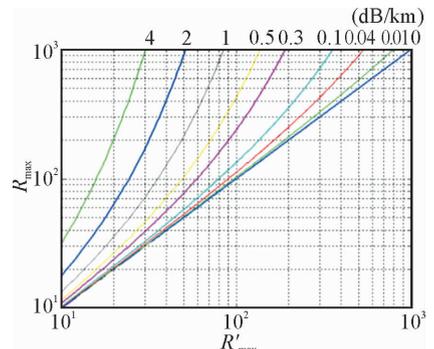


图4 干扰下的作用距离曲线

Fig. 4 Radar range curve after jamming

另一方面,当对敌雷达有了一定的先验知识后,可根据作战环境和需求进行适当的战前准备,如改变干扰物的材料配比、同传统散射型箔条混装、根据任务特点预设干扰物发射模式,甚至和有源干扰结

合实施复合干扰^[15]等,削弱敌方雷达回波能量,压制其雷达最大作用距离,从而保护战机免受伤害。

在航空领域中,机载雷达设备频率一般集中在8~18 GHz,因此选取较为典型的频率10 GHz作为仿真条件,结果见表1。可见随着厚度的不断增加,相应的吸波效果也逐渐变好。

表1 电磁波照射下的吸波衰减情况

Tab. 1 Absorbing attenuation under electromagnetic wave dB

体积分数	厚度/m					
	50	100	150	200	250	300
1.25×10^{-4}	5.0	10.0	15	20.0	25.0	30
1.6×10^{-4}	6.7	13.3	20	26.7	33.3	40
2.0×10^{-4}	8.3	16.7	25	33.3	41.7	50

在战场应用中,为保证干扰物散开后具有足够的浓度,可以通过战机连续投放或多战机联合投放等措施,在达到所需的干扰效果的前提下,避免了资源的浪费,同时达到控制厚度的目的。另一方面,箔条经过长时间的扩散,厚度增加的同时,相应的浓度也在随之减小,因此单次投放的箔条弹数量成为能否对敌方雷达波产生有效衰减作用的关键。在研发生产过程中,选择适当粒度的吸波材料或改变单枚干扰弹中干扰物的装填数量,能为多任务行动提供有力支撑。对于前者,较小的干扰物颗粒粒度会得到较大的比表面积,当粒度缩小到纳米级别时,纳米吸波材料的量子尺寸效应和高表面原子比例可创造新的吸波通道,从而提高对电磁波的吸波性能。

4 结语

本文通过将吸收型箔条云视为单层吸波体,基于电磁波传输线理论和能量守恒原理分析了箔条云对雷达波的干扰机理,建立了雷达回波功率衰减模型,探究了不同厚度,不同频率以及不同体积分数对干扰效能的影响情况,并对雷达最大作用距离进行了分析。下一步将结合箔条在空中的运动扩散情况以及不同吸波材料的选取和配比^[16],进一步研究吸收型箔条云的实战性能。

参考文献(References):

- [1] 才干. 机载无源干扰技术应用的研究[D]. 西安:西北工业大学,2007.
CAI G. Research on the Application of Airborne Passive Jamming Tactics [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)
- [2] XIE H J, LI J B, XU Z F, et al. Analysis of Wide-

band Characteristics and Jamming Technology of Chaff Cloud[C]. IEEE Transactions on 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, IEEE Trans, 2014:1053-1057.

- [3] 贾菲. 湿化学法制备吸收型箔条及其雷达波衰减性能研究[D]. 北京:中国建筑材料科学研究总院,2015.
JIA F. Study on the Preparation and Radar Attenuation Properties of Absorptive Chaff by Wet Chemical Method[D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2015. (in Chinese)
- [4] 缪云坤,金宝源,钟新珍,等. 干扰纤维云对电磁波的衰减[J]. 光电对抗与无源干扰,1997(4):31-32.
MIAO Y K, JIN B Y, ZHONG X Z, et al. The Attenuation of Fiber Cloud to Electromagnetic Wave [J]. Electro-Optic Warfare & Radar Passive Countermeasures, 1997(4): 31-32. (in Chinese)
- [5] 赵伯琳,王卓,饶克谨. 多向定向铁纤维吸波材料的雷达反射特性研究[J]. 电波科学学报,2004,19(3):280-284.
ZHAO B L, WANG Z, RAO K J. Radar Reflection Characteristics Analysis of Multi-Orientation Iron Fiber Absorbing Materials[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(3): 280-284. (in Chinese)
- [6] 胡松,卢景双,徐铜. 箔条压制性干扰对雷达信号衰减的效能评估[J]. 吉林大学学报(信息科学版),2008,26(3):259-262.
HU S, LU J S, XU T. Effect Evaluation of Chaff Suppress Jamming on Power Attenuation of Radar Signal [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2008, 26(3): 259-262. (in Chinese)
- [7] 刘顺华,刘军民,董星龙,等. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京:化学工业出版社,2014.
LIU S H, LIU J M, DONG X L, et al. Electromagnetic Wave Shielding and Absorbing Material [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [8] 冯恩信. 电磁场与电磁波[M]. 西安:西安交通大学出版社,2010.
FENG E X. Field and Wave Electromagnetics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2010. (in Chinese)
- [9] 韩磊,王自荣. 单层雷达吸波涂层电磁参量匹配解析式的推导及其应用[J]. 光电技术应用,2006,21(2):55-58.
HAN L, WANG Z R. Deduction and Application of Electromagnetic Parameters Matching Formula for Single Layer Radar Absorbing Coating [J]. Electro-Optic Technology Application, 2006, 21(2): 55-58. (in Chinese)