

12

毫米波多单元线散射体的雷达散射截面计算

胡守军

(东北电子技术研究所, 辽宁, 锦州, 121000)

TN951

摘要 采用分域基(分段正弦函数)Galerkin法计算了多散射单元一体化结构在8mm和3mm两个波段的雷达散射截面 $\sigma \sim \theta$ (散射角)曲线。结果表明:由于散射单元间的耦合作用,存在适当的结构形式,其雷达散射截面在毫米波段远大于单一谐振单元的散射效果;而且单元间间隙极小,具有较高的散射效率。

关键词 雷达散射截面, 散射单元, 互耦, 散射效率。

毫米波

引言

毫米波散射表现为频带窄,须逐段谐振以覆盖较宽的频带;另外,谐振长度小,长度误差导致雷达散射截面陡峭下降,精度要求苛刻。后一特点带来的特别益处是,谐振长度小则不易弯曲,结构上可以实现多散射单元一体化形式。毫米波雷达束窄、作用距离近、脉冲体积小,因此提高干扰物的散射效率是关键。一体化结构的各散射单元间距极小,降低了对散开空间的需求。由于单元间互耦强烈,须对各谐振频率的雷达散射截面进行优化计算,以确保较高的散射效率。

1 Pocklington 积分方程

由细直导线构成的散射单元,设其与Z轴平行,中心位于原点。

入射场使导线上产生感应电流 $I(z')$, $I(z')$ 激起场以满足边界条件,即导线表面电场切向分量为零,即 $E'_{total} = 0$ 。

$$-E'_{out} = E'_{in}, \tag{1}$$

导出 Pocklington 积分方程^[1]为

$$-\frac{\eta}{jk} \int_{-l}^l G(z, z') I(z') dz' = E'_{in}, \tag{2}$$

式(2)中 $G(z, z') = \frac{e^{-jkr}}{4\pi r^5} [(1 + jkr)(2r^2 - 3a^2) + k^2 a^2 r^2]$ (3)

式(3)中 $r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2 + a^2}$, (4)

a 为散射单元半径。

* 电子工业部基金(编号DJ1.3.5.1)资助项目
稿件收到日期 1998-06-08, 修改稿收到日期 1998-09-25

2 雷达散射截面(RCS)

平行于Z轴的多单元散射体,各散射单元中心位于 (x_0, y_0, z_0) (见图1和图2).所有散射单元均满足Pocklington积分方程,故得到积分方程组:

$$-\frac{\eta}{jk} \sum_{i=1}^N \int_{-l}^{l'} G(z, z') I_i(z') dz' = E_{in}^i(z) |_{z \in [-l, l]}, \quad (5)$$

$$-\frac{\eta}{jk} \sum_{i=1}^N \int_{-l}^{l'} G(z, z') I_i(z') dz' = E_{in}^i(z) |_{z \in [-l, l_j]}, \quad (6)$$

$$-\frac{\eta}{jk} \sum_{i=1}^N \int_{-l}^{l'} G(z, z') I_i(z') dz' = E_{in}^i(z) |_{z \in [-l, l_0]}, \quad (7)$$

式(5)、(6)和(7)中

$$G(z, z') = \frac{e^{-jk r_{ij}}}{4\pi r_{ij}^3} [(1 + jkr_{ij})(2r_{ij}^2 - 3a^2) + k^2 a^2 r_{ij}^2], \quad (8)$$

式(8)中

$$r_{ij} = \sqrt{(x_0 - x'_{0j})^2 + (y_0 - y'_{0j})^2 + [(z + z_0) - (z' + z'_{0j})]^2 + a^2}, \quad (9)$$

式(9)中, r_{ij} 表示第*i*散射单元与第*j*散射单元上某两点间的距离.

考虑入射波为垂直入射,散射远场为

$$E(\theta, \varphi, r) = \frac{-jk\eta e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \sum_{i=1}^N e^{j\xi_i} \int_{-l}^{l'} I_i(z') e^{-jk|r-z'|} dz', \quad (10)$$

式(10)中

$$\varphi_i = k(x_0 \cos\varphi \sin\theta + y_0 \sin\varphi \sin\theta + z_0 \cos\theta), \quad (11)$$

ξ_i 第*i*个为散射单元中心 (x_0, y_0, z_0) 相对于原点的相位.

当 $r \gg \lambda$ 时有

$$\begin{cases} |r - z'| = r + |z'| \cos\theta |_{z' < 0}, \\ |r - z'| = r - |z'| \cos\theta |_{z' > 0}. \end{cases} \quad (12)$$

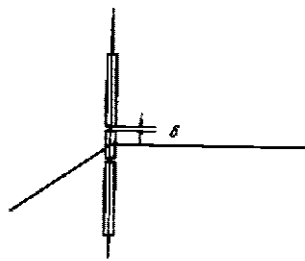


图1 多单元散射体结构

Fig. 1 The structure of scattering units

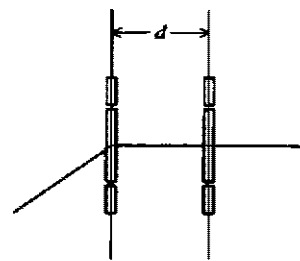


图2 散射体空间分布状态

Fig. 2 The spatial distribution of scattering units

雷达散射截面为^[2]

$$\sigma(\theta) = 4\pi r^2 \frac{|E_{out}|^2}{|E_{in}|^2} = \frac{k^2 \eta^2}{4\pi} \sin^2 \theta \left| \sum_{i=1}^m e^{jk_i z_i} \left(\int_{-l_i}^0 I_i(z') e^{jk_i z' \cos \theta} dz' + \int_0^{l_i} I_i(z') e^{jk_i z' \cos \theta} dz' \right) \right|^2, \quad (13)$$

式(13)中, E_{in} 为入射到散射单元上的电场; E_{out} 为散射场(远场)。

设 $E_{in} = 1$, 先计算 $I_i(z')$, 进而求得 $\sigma(\theta)$ 。采用分段正弦函数^[3](式(14)和(15))及 Galerkin 法以确保收敛性和缩短计算时间。

$$\begin{cases} S_j(z' - c_j) = \frac{\sin[k(\Delta - |z' - c_j|)]}{\sin(k\Delta)} \Big|_{|z' - c_j| \leq \Delta} \\ S_j(z' - c_j) = 0 \Big|_{|z' - c_j| > \Delta} \end{cases}, \quad (14)$$

$$I_i(z') = \sum_{j=1}^m I_j S_j(z' - c_j); \quad (15)$$

式(14)、(15)中, m 为分段数; Δ 为段长度; c_j 为段中心坐标值; I_j 为待求常量。

3 计算结果

3.1 最大雷达散射截面

将 $\sigma(\theta)$ 对 λ^2 归一化 ($\sigma(\theta)/\lambda^2$); $a = 0.005\lambda$; 相对误差 $e < 0.001$; 由于直径因素, 计算得谐振长度为 0.454λ 。将结构细分为“长-短-长”型和“短-长-短”型。计算表明: 单一谐振单元 $\sigma_{max} = 0.8448$; “长-短-长”型 $\sigma_{max}(8\text{mm}) = 2.4496$, $\sigma_{max}(3\text{mm}) = 3.0620$; “短-长-短”型 $\sigma_{max}(8\text{mm}) = 0.9019$, $\sigma_{max}(3\text{mm}) = 3.8264$ (见图 3(a))。

上述结果与折合振子阻抗 (4×74.1) 同理。散射单元间间隙为 $0 \sim 0.05\text{mm}$, 雷达散射截面即能达到最大值。



图 3 (a), (b) $\sigma \sim \theta$ 曲线

Fig. 3 (a), (b) The curves of $\sigma \sim \theta$

3.2 散射效率

单个散射单元的雷达散射截面非常小, 必须依赖由大量散射单元所成云团的整体散射效果。散射效率 $\xi = \sigma/V$, V 为达到 σ 所需最小占空体积。当单个散射单元在通带内的散射效率达到最高时, 整体散射效率才有保证。

考虑图 2 所示的空间分布, $d \approx 2\lambda$, 占空体积 $V \approx (2\lambda)^3$. 计算表明:“长-短-长”型 $\sigma_{\max}(8\text{mm}) = 13.7350$, $\sigma_{\max}(3\text{mm}) = 9.7284$;“短-长-短”型 $\sigma_{\max}(8\text{mm}) = 3.6196$, $\sigma_{\max}(3\text{mm}) = 18.2763$ (见图 3(b)).

4 结语

从图 1 所示结构可见如下特点:

(1) 在 8mm、3mm 波段的雷达散射截面均较单一谐振单元大,且在 3mm 波段大于在 8mm 波段,尤为适应雷达目标 $\sigma \propto 1/\lambda^2$ ($1 \leq a \leq 2$) 的散射特性;

(2) 结构间隙极小,空间利用率高.

该结构是一种高效、宽频带线散射体结构形式.

REFERENCES

- 1 Mitra R, et al. *Computer Techniques for Electromagnetics*, London: Pergmon Press, 1973(金元松译, 计算机技术在电磁学中的应用, 北京:人民邮电出版社), 1981, 14, 22, 27
- 2 Roger F. Harrington, *Field Computation by Moment*, New York: Macmillan Company, 1968, (王尔杰等译, 计算电磁场的矩量法, 北京:国防工业出版社), 1981, 90
- 3 Li Shi-Zhi, *Moment Methods for Electromagnetic Radiation and Scattering*, Beijing: Electronic Industry Press(李世智, 电磁辐射与散射问题的矩量法, 北京:电子工业出版社), 1985, 36, 63

RCS CALCULATION FOR THE MULTIPLE LINEAR SCATTERING UNITS IN MILLIMETER WAVEBAND*

HU Shou-Jun

(Northeast Research Institute of Electronic Technology, Jinzhou, Liaoning 121000, China)

Abstract Based on subsectional bases (sinusoidal bases) with Galerkin method, the $\sigma \sim \theta$ curves of RCS of multiple linear scattering units in 8mm and 3mm wavebands were calculated. The results show that, owing to the coupling between scattering units, not only the maximum RCS in MMW-band is greater but the scattering efficiency is also higher than that of the single unit.

Key words radar cross section, scattering unit, coupling scattering efficiency.

* The project supported by the Foundation of Electronic Industry Administration of China
Received 1998-06-08, revised 1998-09-25