

涂覆型圆柱的散射矩阵及极化分析*

徐 朴** 林昌禄

(电子科技大学微波工程系 成都 610054)

【摘要】 利用物理光学法及平面板元法,对涂覆型圆柱的顶面和侧面的散射矩阵进行了推导和计算;利用一致性几何绕射理论分析了曲棱的一阶绕射场的散射矩阵;指出文献中的错误,然后通过散射矩阵分析目标散射场的极化特性参数和最优极化,给出了具体算例。

关键词 散射矩阵; 极化; 最优极化; 交叉极化; 共极化

中图分类号 O441.4

1 涂覆型大尺寸有限长圆柱的散射矩阵

设入射场为 E^i , 散射场为 E^s 。对单站情况,若以 (\hat{h}, \hat{v}) 表示入射和反射极化基,则散射场和入射场的关系可以用散射矩阵 $[S]$ 表示为

$$E^s = [S]E^i \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} E_h^s \\ E_v^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$[S]$ 中的每一个元素均为复数,并且表示成一个电场分量,这些分量都与以功率量度的雷达散射截面有关。散射矩阵更全面地描述了入射波和目标之间的相互作用,它与目标的极化特性紧密联系,是分析极化特性的重要方法和手段。

为研究涂覆型圆柱体的散射矩阵,首先定义均匀涂覆各向同性 RAM 的金属平板的 Fresnel 反射系数为

$$R_{\perp} = \frac{E_{\perp}^r}{E_{\perp}^i} = \frac{Z' \cos \theta_i - 1}{Z' \cos \theta_i + 1} \quad R_{\parallel} = \frac{H_{\parallel}^r}{H_{\parallel}^i} = \frac{\cos \theta_i - Z'}{\cos \theta_i + Z'} \quad (3)$$

$$\text{其中 } Z' = -j \frac{r}{N} \frac{\tan(Nk_0 d \cos \theta_i)}{\cos \theta_i} \quad Z'' = -j \frac{r}{N} \cos \theta_i \tan(Nk_0 d \cos \theta_i) \quad (4)$$

式中 $N = \sqrt{\epsilon_r}$ 是涂层的折射系数; d 为涂层的厚度; $\sin \theta_i = N \sin \theta_1$; θ_i 为入射方向与外法向矢量的夹角。

对于图 1 所示圆柱, o 为顶面圆心,顶面半径为 a ,高为 $2h$,入射方向为

$$\hat{K} = -y \sin \theta - z \cos \theta \quad \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

并设极化基 (\hat{h}, \hat{v}) 为

$$\hat{h} = \frac{z \times \hat{K}}{|z \times \hat{K}|} \quad \hat{v} = \hat{K} \times \hat{h} \quad (6)$$

1.1 顶面的散射矩阵

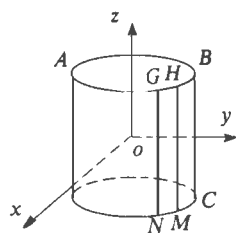


图 1 圆柱的坐标示意图

1996 年 9 月 18 日收稿, 1996 年 12 月 2 日修改定稿

* “九五”国防科技预研项目

** 女 26 岁 博士生

以 B 点为参考点, 顶面的散射矩阵为

$$[S_1] = -\frac{jk e^{-jk r_B}}{4\pi r_B} \exp(-2jk a \sin\theta) \iint d\mathbf{s} \exp(-2jk \hat{K} \cdot \vec{r}) \begin{bmatrix} -2R_{\perp} \cos\theta & 0 \\ 0 & 2R_{\parallel} \cos\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 $\vec{r} = \overline{Ox}$; x 是顶面上任意一点; r_B 为 B 点到场点的距离, 并且

$$\iint d\mathbf{s} \exp(-2jk \hat{K} \cdot \vec{r}) = \begin{cases} c a^2 & \theta = 0 \\ \int_0^{2\pi} \left[\frac{a \exp(am \sinh)}{m \sinh} - \frac{\exp(am \sinh)}{m^2 \sinh^2} \right] dh & \theta \neq 0 \end{cases}$$

$$m = 2jk \sin\theta$$

1.2 侧面的散射矩阵

利用物理光学法及平面板元法将侧面分成若干小矩形板块, 将这些小板块的散射矩阵相加, 就是圆柱侧面的散射矩阵 $[S_2]$ 假设矩形的四个顶点坐标分别为: $G(a \cos\theta_G, a \sin\theta_G, h)$, $H(a \cos\theta_H, a \sin\theta_H, h)$, $M(a \cos\theta_H, a \sin\theta_H, -h)$, $N(a \cos\theta_G, a \sin\theta_G, -h)$, O'' 是矩形的中心, x 是矩形表面上任意一点, 则计算每一个小矩形散射矩阵的公式如下

$$[S_i] = \frac{\exp(-jk r_B)}{r_B} \exp(-2jk \hat{K} \cdot \overline{Bo''}) \iint d\mathbf{s}_i \exp(-2jk \hat{K} \cdot \vec{r}') \begin{bmatrix} r_{hh} & r_{hv} \\ r_{vh} & r_{vw} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 $\vec{r}' = \overline{O''x}$, 积分部分为

$$\iint d\mathbf{s}_i \exp(-2jk \hat{K} \cdot \vec{r}') = \begin{cases} \frac{\sin(2kb_1 p_1) \sin(2kb_2 p_2)}{k^2 p_1 p_2} & p_1 \neq 0, p_2 \neq 0 \\ \frac{2b_1 \sin(2kb_2 p_2)}{k p_2} & p_1 = 0, p_2 \neq 0 \\ \frac{2b_2 \sin(2kb_1 p_1)}{k p_1} & p_1 \neq 0, p_2 = 0 \\ 4b_1 b_2 & p_1 = 0, p_2 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中 $p_1 = \cos\theta$; $p_2 = -\sin\theta \cos \frac{\theta_G + \theta_H}{2}$; $b_1 = h$; $b_2 = a \sin \frac{\theta_H - \theta_G}{2}$, 并且

$$r_{hh} = -\frac{jk}{2c} \sin\theta \sin \frac{\theta_G + \theta_H}{2} (R_{\parallel} h_z^2 - R_{\perp} v_z^2) \quad (10 a)$$

$$r_{hv} = r_{vh} = \frac{jk}{2c} \sin\theta \sin \frac{\theta_G + \theta_H}{2} h_z v_z (R_{\perp} + R_{\parallel}) \quad (10 b)$$

$$r_{vv} = -\frac{jk}{2c} \sin\theta \sin \frac{\theta_G + \theta_H}{2} (R_{\parallel} v_z^2 - R_{\perp} h_z^2) \quad (10 c)$$

式中

$$h_z = \frac{\cos\theta_G + \cos\theta_H}{\cos^2\theta (\sin\theta_G + \sin\theta_H)^2 + (\cos\theta_G + \cos\theta_H)^2} \quad (11)$$

$$v_z = \frac{\cos\theta (\sin\theta_G + \sin\theta_H)}{\cos^2\theta (\sin\theta_G + \sin\theta_H)^2 + (\cos\theta_G + \cos\theta_H)^2} \quad (12)$$

1.3 一阶绕射场散射矩阵

有限长圆柱存在三个一阶绕射点, 即 $A B C$, 它们的散射矩阵分别为

$$[S_A] = \overline{D}(c/2 - \theta, c/2 - \theta, \sqrt{0}^{\xi, h}, \sqrt{1}^{\xi, h}, kr_A) A_A \exp(-jkr_A) \exp(-2jka \sin\theta) \quad (13)$$

$$[S_B] = \overline{D}(c - \theta, c - \theta, \sqrt{0}^{\xi, h}, \sqrt{1}^{\xi, h}, kr_B) A_B \exp(-jkr_B) \quad (14)$$

$$[S_c] = \bar{D}(\theta, \theta, V_1^g, V_0^g, kr_c) A_c \exp(-jkr_c) \exp(-2jkh \cos \theta) \quad (15)$$

A_A, A_B, A_C 是空间衰减因子, 分别为

$$A_A = \frac{j}{r_A} \frac{a}{2 \sin \theta} \quad A_{B,C} = \frac{2h}{r_{B,C}} \frac{a}{2 \sin \theta} \quad (16)$$

并矢绕射系数 \bar{D} 为

$$\bar{D}(h, h, V_1^h, V_2^h, kd) = \bar{M}_n(h, h, V_1^h, V_2^h) \{ \bar{C}_n(h, h, V_2^h, V_1^h) [I D^-(U) + \bar{F}_n(h, V_1^h) D^-(U)] + \bar{C}_n(n^c - h, n^c - h, V_1^h, V_2^h) [\bar{I} D^+(U) + \bar{F}_n(h, V_2^h) D^+(U)] \} \bar{J} \quad (17)$$

式中 $\bar{J} = \begin{bmatrix} 1 & \\ & -1 \end{bmatrix}$ 。由于是单站情况, 所以式 (17) 中要乘以 \bar{J}

在这里特别指出文献 [2] 中计算二阶绕射场的方法是不可行的, 因为并矢绕射系数 \bar{D} 不能计算 $h=0, n^c$ 时的绕射场。

综上所述, 以上各散射矩阵都是以 B 点为相位参考点, 并参考同一极化基, 所以直接相加得到圆柱的散射矩阵为 $[S] = [S_1] + [S_2] + ([S_A] + [S_B] + [S_C])$ 。

2 最优极化

对于已知 $[S]$ 的目标, 最优极化问题就是找到使接收功率达到最大或最小的极化状态。一般情况下, 涂覆型圆柱的 $[S]$ 是非对角形的, 即 $s_{sv} = s_{vs} \neq 0$ 。那么存在一个酉变换矩阵 $[T]$, 将极化基 (\hat{h}, \hat{v}) 变换到另一正交极化基 (\hat{H}, \hat{V}) , 并使得新极化基下的散射矩阵为对角形, 如果用极化比来描述极化状态, 则对角线元素为

$$s_{HH} = (1 + d_1 d_2)^{-1} (s_{hh} + 2d_1 s_{sv} + d_2^2 s_{vv}) \exp(2jJ_1) \quad (18)$$

$$s_{VV} = (1 + d_1 d_2)^{-1} (d_1^2 s_{hh} - 2d_1 s_{sv} + s_{vv}) \exp(2jJ_2) \quad (19)$$

其中

$$d_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (20)$$

式中 $A = s_{hh} s_{vv} + s_{sv} s_{vs}$; $B = |s_{hh}|^2 - |s_{vv}|^2$; $C = -A^*$ 。设 W_2 是 d_2 的相位, 那么

$$J_1 = -\frac{W_2}{2} - \frac{c}{4} \quad J_2 = \frac{W_2}{2} - \frac{c}{4} \quad (21)$$

令 λ_1 是 s_{HH} 和 s_{VV} 中模较大的一个, 模较小的则为 λ_2 , 即 $|\lambda_1| \geq |\lambda_2|$ 。那么在新极化基 (\hat{H}, \hat{V}) 下可以得到交叉极化通道接收功率 P^x 和共极化通道接收功率 P^c 的最优极化结果, 如表 1 所示。表中各变量的上下标中, x 表示交叉极化通道, c 表示共极化通道, m 代表最大值, n 代表最小值, “ \circ ” 表示是新极化基下的变量。

表 1 P^x 与 P^c 的最优极化结果

| 类别 | 极化比 | 接收功率 |
|----------|--|---|
| 交叉极化零点 | $d_{m1} = 0$ 或 $d_{m2} = \infty$ | $P_{xm1,2}^x = 0$ |
| 交叉极化最大值点 | $d_{nm1,2} = \pm (-\frac{\lambda_1}{\lambda_2})^{\frac{1}{2}}$ | $P_{xm1,2}^x = \frac{1}{4} (\lambda_1 + \lambda_2)^2$ |
| 共极化零点 | $d_{nm1,2} = \pm (-\frac{\lambda_1}{\lambda_2})^{\frac{1}{2}}$ | $P_{cm1,2}^c = 0$ |
| 共极化最大值点 | $d_{m1} = 0$ | $P_{cm1}^c = \lambda_1 ^2$ |

3 计算实例

涂覆圆柱的直径为 50 mm, 高为 200 mm, 涂层的厚度为 1.68 mm, 并且 $X = 10.02 - j2.78$, r

$= 1.03 - j0.68$, 入射波的波长为 $\lambda = 10 \text{ mm}$

表 2 和表 3 是入射角 $\theta = 74^\circ$ 时, 最优极化的数值结果。图 2 和图 3 反映了交叉极化接收功率 P^x 和共极化接收功率 P^c 随椭圆倾角 ψ 和椭圆率角 χ 的变化。 ψ 和 χ 的变化表示极化状态的改变。可以看出, 随着极化状态的改变, 各通道的接收功率也不断变化, 而且不同的接收通道之间, 在同一个极化状态下的接收功率一般不同。图中椭圆倾角相同的点组成的曲线, 是一条椭圆倾角等于某一值, 而接收功率随椭圆率角在 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 变化的曲线, 不同椭圆倾角分别对应的这样的曲线之间具有相似的起伏。对于椭圆率角相同的点组成的曲线之间也具有这一特点。另外共极化和交叉极化通道随极化变化趋势一般是相反的, 如果交叉极化通道接收功率随 ψ 或 χ 呈增长的趋势, 则在共极化通道的接收功率是下降的趋势, 反之亦然。

表 2 最优极化各状态参数

| 极化比 | Stocks 矢量 | | | |
|--|-----------|----------|----------|----------|
| | g_0 | g_1 | g_2 | g_3 |
| $\left. \begin{matrix} P_{xn2} \\ d_{m2} \end{matrix} \right\} = \infty$ | 1 | -1.000 0 | 0 | 0 |
| $\left. \begin{matrix} d_{xn1} \\ d_{m1} \end{matrix} \right\} = 0$ | 1 | 1.000 0 | 0 | 0 |
| $d_{m1} = -0.449 + j0.893 5$ | 1 | 0 | -0.449 1 | 0.893 5 |
| $d_{m2} = 0.449 - j0.893 5$ | 1 | 0 | 0.449 1 | -0.893 5 |
| $d_{n1} = 0.557 - j1.108 4$ | 1 | -0.212 2 | 0.438 9 | -0.873 1 |
| $d_{n2} = -0.557 + j1.108 4$ | 1 | -0.212 2 | -0.438 9 | 0.873 1 |

表 3 最优极化的接收功率

| $P_{xn1,2}^x$ | P_{cm1}^c | $P_{cm,2}^c$ | $P_{xm1,2}^x$ |
|---------------|-------------|--------------|---------------|
| 0.000 | 1.004E-10 | 0.000 | 6.832E-011 |

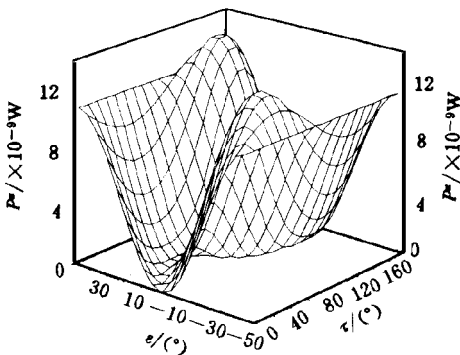


图 2 交叉极化通道接收功率 $P^x - \psi, \chi$ 曲线

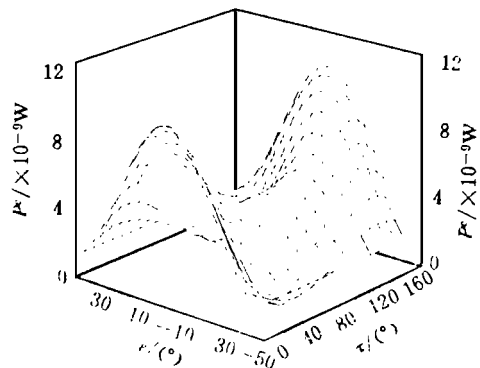


图 3 共极化通道接收功率 $P^c - \psi, \chi$ 曲线

参 考 文 献

- 1 Cho Soon K. Electromagnetic scattering. New York: Springer-Verlag, 1990: 93- 113
- 2 陈忠飞.涂覆型大尺寸有限长圆柱散射特性的混了解法.微波学报,1993,32(1): 1- 11
- 3 Crispin J W, Siegel R M. Methods of radar cross section analysis. New York: Academic Press, 1968: 53
- 4 Xi Anqing, Boerner Wolfgang Martin. Determination of the characteristic polarization states of the radar target scattering matrix $[S(AB)]$ for the coherent monostatic and reciprocal propagation space by using the complex polarization ratio d transformation formulation. JOpt Soc Am A, 1992, 9 (3): 437- 455
- 5 Harold Mott 著,林昌禄等译.天线和雷达中的极化.成都: 电子科技大学出版社,1989
- 6 Boerner W M, Liu Chuanli, Zhuang Xin et al. Polarization dependence in Ultrawideband impulsive radar targets versus clutter discrimination. Ultrawideband radar, 1992, SPIE-1 631: 87- 110

Scattering Matrix of Finite-length Coated Cylinder and Polarization Analyzing

Xu Pu Lin Changlu

(Dept. of Microwave Eng., UEST of China Chengdu 610054)

Abstract With the method of physical optics and the uniform geometric theory of diffraction, the scattering matrix of the backscattered field of a finite-length coated cylinder is presented. The polarization characteristic and the optimal polarization of the scattered field are analyzed. A example is also given in this paper.

Key words scattering matrix; polarization; optimal polarization; co-polarization; cross-polarization

编辑 黄 辛

.....

· 科研成果介绍 ·

快速分组交换体制技术研究

主研人员: 李乐民 孙海荣 蒋志刚 谭真平 刘后铭 何家福 吴晓文

该项研究采用异步转移模式交换的网络体制技术,撰写了 15 篇论文,主要内容为:

- 1) 进行了 ATM 网络中统计复用性能的研究,提出了一种新的近似计算方法,适合于需实时计算的场合。
 - 2) 提出了一种自适应颠速率调整的拥塞控制方法案以及对漏桶算法的性能进行更深入的研究,补充了以往分析的不足。
 - 3) 对国外 ATM 体制技术用于军事通信进行了跟踪。
 - 4) 研究了一种新的信道成组 ATM 交换结构,对分布式排队共享双总线 (DQDB) 结构也进行了研究。
 - 5) 在国内较早地开展无线 ATM 的研究,提出了无线 ATM 中采用纠错编码的方案。
- 该项目达到国内领先水平,达到国际 90 年代初期水平。

· 科 卜 ·