

特殊散射矩阵和极化特性分析¹

徐 朴 林昌禄*

(西北工业大学航海工程学院 西安 710072)

*(电子科技大学微波工程系 成都 610054)

摘 要 本文利用散射矩阵和单站雷达系统的最优极化状态分析,提出了共极化匹配系数、交叉极化匹配系数和自适应极化匹配系数三个新概念和便于计算的表达式。对三类特殊形式散射矩阵对应的散射问题进行了极化特性分析,并给出了若干结论。

关键词 散射矩阵,极化匹配系数,极化比,最优极化

中图分类号 TN951

1 引 言

电磁场是矢量场,除了振幅、频率和相位外,它还具有一种可观察的物理特性,即极化特性。雷达极化的研究始于本世纪 40 年代和 50 年代初。近十年来,由于微波技术与数字信号处理技术已取得了一系列最新成就,利用极化特性所包含的目标对称性和空间取向等有关的信息,提高目标检测和识别性能已逐渐成为可能。目前的雷达系统一般仍以固定极化方式工作,未能充分利用极化特性。国外利用全极化特征、目标幅度起伏特征等方法进行了大量雷达目标识别和分类的研究工作。而国内在全极化技术和高分辨率成像识别技术进行综合方面则处于初级阶段,迫切需要对极化理论及其应用进行深入的研究。

根据极化散射矩阵识别目标是利用极化信息识别目标的主要方法之一。本文利用散射矩阵对反映极化匹配程度的极化匹配系数进行了分析,根据单站雷达系统的实际情况提出了三种极化匹配系数,并对三类特殊形式散射矩阵对应的散射问题进行了极化特性分析。

2 极化匹配系数

在单站雷达系统中,若以 (\hat{h}, \hat{v}) 表示散射场 \bar{E}^s 和入射场 \bar{E}^i 的极化基,那么散射场和入射场分量之间的关系可以用散射矩阵 $[S]$ 表示为

$$\begin{bmatrix} E_h^s \\ E_v^s \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{h\nu} \\ S_{\nu h} & S_{\nu\nu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{bmatrix}. \quad (1)$$

若 $E_h^s \neq 0$, 则设入射场和散射场的极化比为 $\rho_i = E_v^i/E_h^i$, $\rho_s = -E_v^s/E_h^s$ 。

通讯系统中常需要考虑收、发天线间的极化匹配问题^[1]。在保持阻抗匹配的条件下,将天线实际接收功率与最佳极化匹配条件下的接收功率之比定义为极化匹配系数。它反映了来波与接收极化间的匹配程度。在单站雷达系统中,也存在着极化匹配问题。天线发射的电磁波经过目标的散射后,散射波又被该天线接收,接收功率与发射、接收极化以及目标特性密切相关。如果极化匹配,天线就可以最大限度的接收信号;反之,接收信号可能很小,甚至为零。所以研究单站雷达系统中的极化匹配问题具有重要的意义。

¹ 1996-10-15 收到, 1998-04-31 定稿
国防科工委基金资助项目

单站雷达系统的极化匹配问题也可以用极化匹配系数来描述,但是由于是单站情况,并且对接收极化通道可能进行限制,或者以共极化接收,或者以交叉极化接收,对天线的实际接收情况和最佳极化条件下接收情况的分析都将与通讯系统不同。加之目标对入射极化波的影响,不能仅考虑散射波与接收极化的匹配程度。因此原有的极化匹配系数定义在单站雷达系统中已不能充分反映发射极化、目标以及接收极化之间的相互影响,同时也不能准确反映极化匹配程度。由此可见重新定义极化匹配系数的必要性。在单站雷达系统中根据天线接收和发射时极化状态的关系,引入三个新概念:

定义 1 共极化匹配系数 在单站雷达系统中,当天线接收和发射为共极化时,天线实际接收功率与天线在共极化接收的最优化条件下的最大接收功率之比,叫做共极化匹配系数,记做 γ_c 。

定义 2 交叉极化匹配系数 在单站雷达系统中,当天线接收和发射为交叉极化时,天线实际接收功率与天线在交叉极化接收的最优化条件下的最大接收功率之比,叫做交叉极化匹配系数,记做 γ_x 。

定义 3 自适应极化匹配系数 在单站雷达系统中,在入射极化一定的情况下,当接收天线的极化可以改变,不受发射极化的制约时,天线实际接收功率与天线在最佳极化匹配条件下的接收功率之比,叫做自适应极化匹配系数,记做 γ_a 。

显然自适应极化匹配系数与通讯系统中定义的极化匹配系数是一致的,即只考虑来波(此时指目标的散射波)与接收极化之间的极化匹配。

一般情况下, $[S]$ 是非对角形的,即 $S_{h\nu} = S_{\nu h} \neq 0$ 。那么存在一个酉变换矩阵,将极化基 $(\hat{h}, \hat{\nu})$ 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^[2]:

$$[S'] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 $|\lambda_1| \geq |\lambda_2|$ 。设 ρ' 是极化基 (\hat{H}, \hat{V}) 下的入射极化比,根据最优极化分析^[2]和极化匹配系数的定义,得到共极化匹配系数和交叉极化匹配系数易于计算的表达式:

$$\gamma_c = \frac{(1 + \rho' \rho'^*)^{-2} (|\lambda_1|^2 + \lambda_1 \lambda_2^* \rho'^{*2} + \lambda_1^* \lambda_2 \rho'^2 + |\lambda_2|^2 \rho'^2 \rho'^{*2})}{|\lambda_1|^2}, \quad (3)$$

$$\gamma_x = \frac{4(1 + \rho' \rho'^*)^{-2} (|\lambda_1|^2 \rho' \rho'^* - \lambda_1 \lambda_2^* \rho'^{*2} - \lambda_1^* \lambda_2 \rho'^2 + |\lambda_2|^2 \rho' \rho'^*)}{(|\lambda_1| + |\lambda_2|)^2}. \quad (4)$$

设 ρ^r 为接收极化比,则自适应极化匹配系数的计算式为

$$\gamma_a = \frac{|(S_{hh} + S_{h\nu} \rho^i) + \rho^r (S_{\nu h} + S_{\nu\nu} \rho^i)|^2}{(1 + |\rho^r|^2) (|S_{hh} + S_{h\nu} \rho^i|^2 + |S_{\nu h} + S_{\nu\nu} \rho^i|^2)}. \quad (5)$$

三种极化匹配系数直接反映了不同极化入射时,各接收极化通道实际接收功率的效率,是一种直观体现极化作用的方法。其实际意义就在于可以根据其值的大小迅速判断极化匹配程度,从而改变入射或接收极化,以便最大或最小地接收信号,达到理想的目标检测或抗干扰的目的。

3 特殊散射矩阵和极化特性分析

3.1 散射矩阵 $\begin{bmatrix} \lambda & \\ & \lambda \end{bmatrix}$ 和极化特性分析

在散射问题中,常常遇到这种散射矩阵,例如当电磁波沿法线方向入射到平板时产生的散射矩阵。在这种情况下,入射场和散射场的极化比 ρ^i 、 ρ^s 满足 $\rho^s = -\rho^i$ 。这表明散射场和入射场是同种极化波,但旋向相反。对于同一个目标,如果两个入射极化波的极化比是相反数,即 $\rho_1^i = \rho_2^i$, 那么 $\rho_1^s = -\rho_2^s$ 。另外得到以下结论:

结论 1 如果散射矩阵是 $\begin{bmatrix} \lambda & \\ & \lambda \end{bmatrix}$, 则当入射波的极化比为任意实数(包括 ∞), 即是任意线极化时,共极化通道的接收功率最大,交叉极化通道的接收功率为零。当入射波是极化比为 $\pm\lambda$ 的圆极化波时,交叉极化通道的接收功率最大,共极化通道的接收功率为零。共极化通道和交叉极化通道的最大接收功率都等于 $|\lambda|^2$ 。

结论 2 设 ρ 为入射极化比,即 $\rho = \rho^i$, 则极化匹配系数的计算公式为

$$\gamma_c = \left(\frac{|1 + \rho^2|}{1 + |\rho|^2} \right)^2, \quad \gamma_x = \frac{4(\text{Im}\rho)^2}{(1 + |\rho|^2)^2}. \quad (6)$$

结论 3 如果散射矩阵是上述形式,那么对于具有相同极化椭圆形状(即椭圆率角 ϵ 相等而倾角 τ 不等)的入射极化波,共极化通道的接收功率和交叉极化通道的接收功率 P^c 、 P^x 对应相等,并且 $P^c = |\lambda|^2 \cos^2(2\epsilon)$, $P^x = |\lambda|^2 \sin^2(2\epsilon)$, $P^c + P^x = |\lambda|^2$ 。

结论 4 如果散射矩阵是上述形式,那么共极化匹配系数 γ_c 和交叉极化匹配系数 γ_x 分别为 $\gamma_c = \cos^2(2\epsilon)$, $\gamma_x = \sin^2(2\epsilon)$, $\gamma_c + \gamma_x = 1$ 。

结论 5 对上述形式的散射矩阵,两个入射极化波的极化比 ρ_1^i, ρ_2^i 只要满足 $\rho_1^i = -\rho_2^i$, 那么它们各自的交叉极化通道和共极化通道的接收功率满足 $P_1^x = P_2^x, P_1^c = P_2^c$ 。特别地,这一对极化波是左旋圆极化波和右旋圆极化波。

结论 6 对于满足结论 5 条件的散射矩阵和极化比,它们的散射场的极化匹配系数分别对应相等,即 $\gamma_{x1} = \gamma_{x2}, \gamma_{c1} = \gamma_{c2}$ 。

3.2 散射矩阵 $\begin{bmatrix} \lambda_1 & \\ & \lambda_2 \end{bmatrix}$ ($|\lambda_1| > |\lambda_2|$) 和极化特性分析

入射场和散射场的极化比满足 $\rho^s = -(\lambda_2/\lambda_1)\rho^i$, 那么当 $\rho^i = 0, \infty$ 时,即入射波是水平或垂直线极化波时, $\rho^s = 0, -\infty$, 即散射波也是水平或垂直线极化波。其他极化的入射波经目标散射后将不是同类极化波。对于同一个目标,如果两个入射极化波的极化比是相反数,即 $\rho_1^i = -\rho_2^i$, 那么也满足 $\rho_1^s = -\rho_2^s$ 。

当入射极化波是水平线极化时,共极化通道接收功率最大为 $|\lambda_1|^2$ 。入射极化比为 $\rho = \pm(-\lambda_1/\lambda_2)^{1/2}$ 时,共极化通道接收功率为零。当入射极化波是水平或垂直线极化时,交叉极化通道接收功率为零。当入射极化比为 $\rho = \pm j[\lambda_1 \lambda_2^*/(\lambda_1^* \lambda_2)]^{1/4}$ 时,交叉极化通道接收功率最大为 $(1/4)(|\lambda_1| + |\lambda_2|)^2$ 。

3.3 散射矩阵 $\begin{bmatrix} a & b \\ b & a \end{bmatrix}$ ($b \neq 0$) 和极化特性分析

对于这种形式的散射矩阵, 此时任意极化的入射波, 其散射波的极化状态都将改变, 同时还得到下列结论:

结论 7 对 $\begin{bmatrix} a & b \\ b & a \end{bmatrix}$ 形式的散射矩阵 (其中 $b \neq 0$), 两个入射极化波的极化比 ρ_1^i, ρ_2^i 只要满足 $\rho_1^i \cdot \rho_2^i = 1$, 那么它们各自的交叉极化通道和共极化通道的接收功率满足 $P_1^x = P_2^x$, $P_1^c = P_2^c$. 特别地, 这一对极化波是水平线极化波和垂直线极化波, 或者是左旋圆极化波和右旋圆极化波.

结论 8 对于满足上面条件的散射矩阵和极化比, 它们的散射场的极化匹配系数分别对应相等, 即 $\gamma_{x1} = \gamma_{x2}$, $\gamma_{c1} = \gamma_{c2}$, $\gamma_{a1} = \gamma_{a2}$ (接收极化比 $\rho_1^r = \rho_2^r$).

结论 9 对于满足上面条件的散射矩阵, 下面的式子成立:

$$P^x|_{\rho=0} = P^x|_{\rho=\infty} = P^c|_{\rho=j} = P^c|_{\rho=-j} = \frac{1}{4}(|\lambda_1|^2 - \lambda_1\lambda_2^* - \lambda_1^*\lambda_2 + |\lambda_2|^2), \quad (7)$$

$$P^c|_{\rho=0} = P^c|_{\rho=\infty} = P^x|_{\rho=j} = P^x|_{\rho=-j} = \frac{1}{4}(|\lambda_1|^2 + \lambda_1\lambda_2^* + \lambda_1^*\lambda_2 + |\lambda_2|^2), \quad (8)$$

$$\gamma_c|_{\rho=0} = \gamma_c|_{\rho=\infty} < \gamma_x|_{\rho=j} = \gamma_x|_{\rho=-j}, \quad (9)$$

$$\gamma_x|_{\rho=0} = \gamma_x|_{\rho=\infty} > \gamma_c|_{\rho=j} = \gamma_c|_{\rho=-j}. \quad (10)$$

参 考 文 献

- [1] 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, 140-145.
- [2] An-Qing Xi, Wolfgang-Martin Boerner. 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 transformation formulation. J. Opt. Soc. Am. A, 1992, 9(3): 437-455.
- [3] 徐 朴. 典型涂覆目标电磁散射的极化特性分析: [博士论文]. 成都: 电子科技大学, 1997, 35-70.

THE SPECIAL SCATTERING MATRICES AND POLARIZATION ANALYSIS

Xu Pu Lin Changlu

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

Abstract Three new concepts of the monostatic radar system: co-polarization match factor, cross-polarization match factor, adaptive polarization match factor, are presented. Their easily calculated expressions are given. Then the polarization corresponding to three special scattering matrices is analyzed.

Key words Scattering matrix, Polarization match factor, Polarization ratio, Optimal polarization

徐 朴: 女, 1970 年生, 博士后, 研究方向为天线、电磁理论、信号和信息处理等.

林昌禄: 男, 1937 年生, 教授, 博士生导师, 现从事天线、电磁理论和电磁兼容方面的教学和研究工作.