

# 基于非相干变极化测量技术的 散射源参数估算研究

王雪松 庄钊文 肖顺平 曾勇虎 李盾

(国防科技大学 ATR 国家重点实验室, 湖南, 长沙, 410073)

TN011

**摘要** 针对复杂电磁环境中独立散射源参数的估算问题, 提出了一种非相干变极化接收方案, 有效地获取了反映散射源信息的4个参数. 研究了非相干变极化技术对散射源参数的估算能力, 针对具体应用背景, 构建了几种典型的散射源参数估算模型, 并利用一系列数值实测对这些模型进行了验证.

**关键词** 极化轨道, 信号增强, 变极化, 参数估计, 毫米波.

电磁信号 散射源

## 引言

电磁信号增强问题已成为现代恶劣电磁环境中雷达、遥感、通信、导航等领域面临的重要问题. 随着人们对电磁波极化特性的认识日益加深, 以及极化捷变和分集技术的发展, 已经出现了一些利用变极化技术进行电磁信号增强的工作<sup>[1~3]</sup>. 在这些工作中, 几乎所有的理论结果都是全部或部分地基于散射源参数的先验知识给出的. 但是在有些场合, 这些关于散射源的先验知识往往是难以获取的, 所以此时要进行电磁信号的极化处理, 首要的工作就是尽可能充分利用变极化接收技术来获得未知散射源的信息. 在电磁散射过程中, 特别是在毫米波段, 往往存在着很强的散射去相关效应, 使得很难有效地对散射信号应用相干方式进行接收. 在这种情况下, 采用相干接收技术, 尽管付出了高昂的代价, 却未能获得相应的接收效果, 对于某些特殊目标甚至得到错误的测量结果<sup>[4]</sup>. 因此, 本文着重讨论利用非相干变极化接收技术进行散射源参数的估算.

## 1 多散射源情况下基于极化轨道约束的天线接收功率

设极化基  $(\hat{A}, \hat{B})$  下电场矢量为  $\vec{E} = [E_A, E_B]^T$ , 定义椭圆极化比<sup>[5]</sup>:

$$q = \frac{E_B}{E_A} = \text{tg} \gamma \exp(j\phi), \quad (1)$$

则可将 Poincare 极化球上的以  $\hat{A}\hat{B}$  为轴、经度为  $\phi_0$  的大圆轨道和以  $\hat{A}\hat{B}$  为轴、纬度为  $\alpha_0$  的小圆轨道分别记为  $\Psi(\phi_0; \hat{A}\hat{B})$  和  $\Theta(\alpha_0; \hat{A}\hat{B})$ <sup>[3]</sup>, 这里的  $\alpha = 2\gamma$ .

在极化测量过程中, 假设在接收天线主瓣内存在着  $N$  个独立散射源, 每个散射源的强

度为  $I_k$ , 极化为  $P_k = t_g \gamma_k e^{j\beta_k}$ ,  $\gamma_k \in [0, 2\pi]$ ,  $k=1, 2, \dots, N$ . 接收系统热噪声与各散射源以及接收天线极化无关, 噪声功率电平记为  $N_0$ . 设接收极化为  $\vec{a}(\alpha, \phi)$ ,  $\alpha \in [0, \pi]$ ,  $\phi \in [0, 2\pi]$ , 则接收天线主瓣内散射场的平均接收功率为:

$$P_r(\vec{a}) = \sum_{k=1}^N G(\theta_k, \phi_k) I_k \cos^2\left(\frac{\beta_k}{2}\right) + N_0, \quad (2)$$

其中  $(\theta_k, \phi_k)$  代表第  $k$  个散射源相对于接收天线电轴的空间角坐标,  $G(\theta_k, \phi_k)$  为天线方向增益,  $\beta_k$  代表第  $k$  个散射源的极化  $\vec{i}_k(\alpha_k, \phi_k)$  与接收极化  $\vec{a}(\alpha, \phi)$  在 Poincare 球上夹的球面角,  $\cos^2\left(\frac{\beta_k}{2}\right)$  反映了第  $k$  个散射源与接收天线的极化匹配程度<sup>[1]</sup>. 为了数学上处理方便起见, 可以将  $G(\theta_k, \phi_k) I_k$  合为一项, 仍记为  $I_k$ . 利用球面几何学可得:

$$P_r(\alpha, \phi) = \frac{1}{2} L_0 + \frac{1}{2} M_0 \cos \alpha + \frac{1}{2} \sqrt{A^2 + B^2} \cos(\phi - \delta) \sin \alpha, \quad (3)$$

其中各参数分别为  $L_0 = \sum_{k=1}^N I_k + 2N_0$ ,  $M_0 = \sum_{k=1}^N I_k \cos \alpha_k$ ,  $A = \sum_{k=1}^N I_k \sin \alpha_k \cos \phi_k$ ,  $B = \sum_{k=1}^N I_k \sin \alpha_k \sin \phi_k$ ,  $\cos \delta = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}$ ,  $\sin \delta = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}}$ ; 由式(3)可见,  $P_r(\alpha, \phi)$  在  $\Psi(\phi_0)$  和  $\Theta(\alpha_0)$  上均为三角函数, 且周期均为  $2\pi$ , 故容易求得  $P_r(\alpha, \phi)$  的局部最优解, 此处不予详述.

## 2 利用非相干变极化接收技术估算散射源参数

根据天线接收功率表达式(3)可见, 其中只有  $L_0$ 、 $M_0$ 、 $A$  和  $B$  这 4 个参数反映了散射源以及噪声功率电平的信息. 事实上, 如果采用非相干变极化测量的方法, 而且针对互不相关的散射源和独立噪声的情况, 那么利用变极化技术所能获得的关于天线主瓣内散射源的全部信息就是这 4 个参量. 通过适当的变极化接收步骤, 可以估算这 4 个参量. 首先令接收极化矢量  $\vec{a} \in \Theta(\pi/2)$ , 则有  $P_r(\pi/2, \phi) = \frac{1}{2} L_0 + \frac{1}{2} \sqrt{A^2 + B^2} \cos(\phi - \delta)$ , 通过在该轨道上进行“全轨道”变极化接收, 可以得到  $L_0$ 、 $A$  和  $B$  的估计式为:

$$L_0 = \text{Max} P_r(\pi/2, \phi) + \text{Min} P_r(\pi/2, \phi), A = [\text{Max} P_r(\pi/2, \phi) - \text{Min} P_r(\pi/2, \phi)] \cos \delta, B = [\text{Max} P_r(\pi/2, \phi) - \text{Min} P_r(\pi/2, \phi)] \sin \delta, \text{ 其中 } \delta \text{ 为使 } P_r \text{ 最大的 } \phi \text{ 值. 再令 } \vec{a} \in \Theta(0), \text{ 则得 } P_r(0, \phi) = \frac{1}{2} L_0 + \frac{1}{2} M_0.$$

得到  $M_0$  的估计值为  $M_0 = 2P_r(0, \phi) - [\text{Max} P_r(\pi/2, \phi) + \text{Min} P_r(\pi/2, \phi)]$ . 由此可见, 确定  $L_0$ 、 $M_0$ 、 $A$ 、 $B$  这 4 个参数, 只需进行如下两个变极化接收步骤即可: (1) 在  $\Theta(\pi/2)$  上进行全圆环变极化接收; (2) 在  $\Theta(0)$  处单极化接收.

在实际测量情况中, 比如在通信问题中, 散射源的极化一般是已知的, 而且散射信号具有较高的极化度, 这时需要确定的只有散射源的强度参数. 针对诸如此类的实际背景, 可以建立相应的散射源参数估算模型.

### 2.1 散射源强度参数估算模型

如果已知散射源的极化参数估算散射源的强度, 则可用矩阵形式表示为:

$$\begin{bmatrix} L_0 \\ M_0 \\ A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ g_1 \cos \alpha_1 & g_2 \cos \alpha_2 & \cdots & g_N \cos \alpha_N \\ g_1 \sin \alpha_1 \cos \phi_1 & g_2 \sin \alpha_2 \cos \phi_2 & \cdots & g_N \sin \alpha_N \cos \phi_N \\ g_1 \sin \alpha_1 \sin \phi_1 & g_2 \sin \alpha_2 \sin \phi_1 & \cdots & g_N \sin \alpha_N \cos \phi_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2N_0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

由式(4)可见,这是一个  $4 \times N$  阶线性方程组,系数矩阵为  $[R] = \begin{bmatrix} E_1 \\ \cdots \\ Q \end{bmatrix}$ ,其中  $[E_1] = [1, 1, \cdots, 1, \cdots]$ . 当  $N \leq 3$  时,若  $[R]$  列满秩,则式(4)成为一个超定方程组,可以采用最小二乘(LS)法求解;若  $[Q]_{3 \times N}$  亦列满秩,可得  $I = [I_1, \cdots, I_N]^T$  的 LS 解为  $I = (Q^T Q)^{-1} Q^T [M_0, A, B]^T$ ,再将其代入式(4)即可求得  $N_0$ . 注意到,此时得到的解是唯一的. 当  $N=4$ ,若  $[R]$  满秩,则可估算得到散射源的强度参数,只是其中  $L_0$  被  $L_0 - 2N_0$  代替,因而必须利用其它的辅助测试方法得到  $N_0$  的估计. 这时的解亦是唯一的. 除以上两种情形外,利用矩阵的广义逆以及适当的求解准则也可以得到式(4)的解,但是这时解通常不再唯一.

## 2.2 正交散射源强度估算模型

在实际情况中接收天线主瓣中的多个散射源里只有一个是信号源,并且知道这个信号源的极化参数,但是对其余干扰源的数目、强度和极化参数往往缺乏先验的信息. 这时可以将每个干扰源进行正交极化分解,并在相应的极化通道上进行非相干合成,从而等效为两个正交的散射源:共极化散射源和交叉极化散射源. 这时等效的参数估算模型为:已知一对正交散射源的极化参数,来估算它们的强度参数. 显而易见,这种模型对于单信号源条件下的电磁信号增强问题有着特别重要的意义.

设信号极化为  $(\alpha, \phi)$ ,则其交叉极化为  $(\pi - \alpha, \pi + \phi)$ ,代入式(4)后容易解得:  $I_1 = \frac{1}{2} \left( L_0 + \frac{M_0}{\cos \alpha_1} \right) - N_0$ ,  $I_2 = \frac{1}{2} \left( L_0 + \frac{M_0}{\cos \alpha_1} \right) - N_0$ ,其中  $\alpha_1 \neq \pi/2$  (这可通过适当选择极化基来做到),  $I_1, I_2$  分别为共极化源和交叉源的强化参数.

## 3 数值仿真实验

为了验证几种散射源参数估算模型,本文进行了数值仿真实验.

假设天线主瓣内有 3 个散射源,其极化和散射源强度参数分别为:  $(\alpha_1, \phi_1) = (0, 0)$ ,  $I_1 = \sigma$ ;  $(\alpha_2, \phi_2) = (\pi/2, 0)$ ,  $I_2 = 0.5\sigma$ ;  $(\alpha_3, \phi_3) = (\pi/2, \pi/2)$ ,  $I_3 = 2\sigma$ . 其中  $\sigma$  为相对功率单位,并设噪声功率电平为  $N_0 = \sigma$ . 则容易算得:  $M_0 = \sigma$ ,  $A = 0.5\sigma$ ,  $B = 2\sigma$ ,  $L_0 = 3.5\sigma + 2N_0 = 5.5\sigma$ ,注意到这 4 个参数其实是由测量得到的.

利用散射源强度参数估算模型,将上述散射源参数代入式(4)后可得  $\hat{I}_1 = \sigma$ ,  $\hat{I}_2 = 0.5\sigma$ ,  $\hat{I}_3 = 2\sigma$ ,  $N_0 = \sigma$ . 如果将其中第 3 个散射源的极化参数变为  $(\pi/2, \pi)$ ,并增加第 4 个散射源为  $I_4 = 3\sigma$ ,  $(\alpha_4, \phi_4) = (\pi, 0)$ ,则可以发现  $[R]$  为一个奇异阵,此时模型失效. 由该模型参数设置可见,其目的是将多个散射源的合成作用等效地分解为 2 对正交极化散射源. 例如,若选左旋、右旋圆极化为极化基,则这两对正交极化为左旋、右旋圆极化和水平、垂直极化. 然而如上所述,这种思路是行不通的. 事实上容易证明,对于任意两对正交极化,  $[R]$  均为奇

异的。

如果采用正交散射源强度估算模型,由测量得到4个参数为 $L_0=8.5\sigma$ , $A=-1.5\sigma$ , $B=0$ , $M_0=-2\sigma$ 。采用第一个散射源作为信号源,则得到共极化和交叉极化散射源的强度参数为(此处散射源的强度用 $J$ 来表示) $J_1=3.25\sigma-N_0$ 和 $J_2=5.25\sigma-N_0$ 。如果知道噪声电平 $N_0=\sigma$ ,则有 $J_1=2.25\sigma$ , $J_2=4.25\sigma$ 。根据极化的正交分解,容易计算得到 $J_1=2.25\sigma$ , $J_2=4.25\sigma$ 。由此可见,正交散射源强度估算模型可以有效地估算出单信号源情况下天线主瓣内散射源的等效强度,而且在通常情况下模型不会失效。

#### 4 结语

利用变极化技术进行散射源参数估算以及电磁信号增强,是愈来愈受到人们重视的研究课题。本文针对非相干接收背景,提出了一种变极化方案,得到了能够反映散射源信息的全部4个参数,在此基础上针对一些具体应用背景构建了几种典型的散射源参数估算模型,并用数值实例进行了验证。对于无测量误差的情况,本文的结论是严格成立的,但对于实际情况,需要将测量误差对这些参数估算模型的影响作进一步的分析和研究。

#### 参考文献

- 1 Stapor D P. *IEEE Trans.*, 1995, AP~43(5), 473~477
- 2 王雪松,肖顺平,曾勇虎,等. *微波学报*, 1997, (1), 33~42
- 3 王雪松,庄钊文,肖顺平,等. *微波学报*, 1997, (4), 306~317
- 4 Mead J B, Pazmeny A L, et al. *Radio Science*, 1996, 31(2), 325~333
- 5 肖顺平. *宽带极化雷达目标识别的理论及应用*(博士学位论文). 国防科技大学电子工程学院, 1995

### INVESTIGATION ON PARAMETER ESTIMATION OF SCATTERERS USING INCOHERENT COP MEASUREMENT TECHNIQUES

Wang Xuesong Zhuang Zhaowen Xiao Shunping Zeng Yonghu Li Dun  
(ATR Lab. of National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** An efficient incoherent COP (Change-of-Polarization) receiving scheme was presented to extract 4 parameters, which contain the information of scatterers in view of estimation of scatterers' parameters in the adverse electromagnetic circumstance. The estimation capacity of incoherent COP was investigated. Several characteristic parameter estimation models were constructed in connection with some special application backgrounds. Finally, conclusions and models were verified by a series of numerical examples.

**Key words** polarization tracks, signal enhancement, Change-Of-Polarization (COP), parameter estimation, millimeter waves.