

# 多站频扫成象的模拟研究\*

马新才 冯孔豫

(中国科学院电子学研究所,北京 100080)

**摘要** 本文对点目标用计算机模拟多站频扫成象,所得结果非常直观地显示.依据冯孔豫等人(1991)对 Bojarski 恒等式的扩展形式提出的多站频扫成象与依据 S.R.Raz 的不考虑极化方向改变的多站频扫成象相比,成象效果得到了明显的改善.

**关键词** 电磁散射; Bojarski 恒等式;多站频扫成象

## 1. 引言

Bojarski 恒等式是在物理光学近似、反向散射条件下导出的<sup>[1]</sup>.它只能用于单站散射成象系统. S.R. Raz<sup>[2]</sup>曾在  $\hat{k} \cdot \mathbf{E}^i - \hat{k}_0 \cdot \mathbf{E}^i = 0$  条件下将它扩展到多站散射成象.文献[3]则将其扩展到普遍的多站散射机制上.多站散射成象有可能使成象系统简化,缩短获取成象所需信息的时间,对动目标则能降低对运动补偿的要求.本文的目的就是试图通过计算机模拟显示文献[3]的理论工作给雷达成象带来的好处.

## 2. 理论考虑

设单色平面电磁波由(1),(2)式表述:

$$\mathbf{E}^i(t, \mathbf{R}') = \hat{e}^i E^i \exp[-ik(\hat{R}_i \cdot \mathbf{R}' + R_i) + i\omega t] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}^i(t, \mathbf{R}') &= (\varepsilon/\mu)^{1/2}(\hat{R}_i \times \mathbf{E}^i) \\ &= \hat{h}^i H^i \exp[-ik(\hat{R}_i \cdot \mathbf{R}' + R_i) + i\omega t] \end{aligned} \quad (2)$$

设这个平面波从任意方向照射导体目标如图1,则在物理光学近似下,远区散射场的普遍表达式应为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^s &= -(i\omega\mu H^i / (2\pi R_r)) \exp(-ikR) \\ &\times \int_{S_0} \{ \hat{a} \times \hat{h}^i - [(\hat{a} \times \hat{h}^i) \cdot \hat{R}_r] \\ &\times \hat{R}_r \} \exp[ik\mathbf{R}' \cdot (\hat{R}_r - \hat{R}_i)] dS' \end{aligned} \quad (3)$$

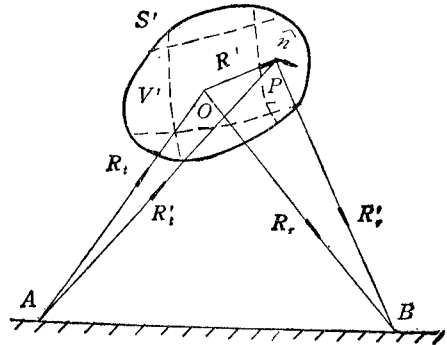


图1 电磁散射的几何关系

图中的“O”是目标的相位参考点, P 是所考虑的散射源点,  $\mathbf{R}_i$  是从发射机 A 到“O”的距离矢量,  $\mathbf{R}_r$  是从“O”到接收机 B 的距离矢量,  $\hat{a}$  是 P 点的外向法线单位矢量, 而  $\mathbf{R}'$  则

1991.06.24 收到,1991.10.16 定稿  
\* 国家自然科学基金资助项目。

为自“O”到P的距离矢量,且

$$R = R_t + R_r, \quad k = \omega/c$$

经过一系列推导<sup>[3]</sup>,得到恒等式

$$\begin{aligned} \Gamma(\mathbf{P}) &= \sqrt{\pi} |\rho_+ + \rho_-| / |k[\mathbf{e}_1(\hat{\theta}^i \cdot \mathbf{p}) - \mathbf{e}_2(\hat{R}_t \cdot \mathbf{p})]| \\ &= \int_{V'} \exp(i\mathbf{R}' \cdot \mathbf{p}) dV' \triangleq \int_{\infty} \gamma(\mathbf{R}') \exp(i\mathbf{R}' \cdot \mathbf{p}) dV' \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $\gamma(\mathbf{R}') = 1, \mathbf{R}' \in V'; \gamma(\mathbf{R}') = 0, \mathbf{R}' \notin V'$

$$\mathbf{e}_1 = \hat{R}_t \times (\hat{R}_t \times \hat{R}_r), \quad \mathbf{e}_2 = \hat{R}_r \times (\hat{\theta}^i \times \hat{R}_t), \quad \mathbf{p} = k(\hat{R}_r - \hat{R}_t)$$

$$\rho_+ = \rho(k, \hat{R}_t, \hat{R}_r) = 2R_r \sqrt{\pi} \mathbf{E}^i / (E^i \exp(-ikR)), \quad \rho_- = \rho(k, -\hat{R}_t, -\hat{R}_r)$$

(4)式中 $|\dots|$ 指取矢量模,只要分母不为零,(4)式总成立,它是 Bojarski 恒等式的普遍形式.如令(4)式中  $\hat{R}_t = -\hat{R}_r$ ,即得用于反向散射的 Bojarski 恒等式的本来形式.由(4)式可得

$$\gamma(\mathbf{R}') = (2\pi)^{-3} \int_{\text{whole space}} \Gamma(\mathbf{p}) \exp(-i\mathbf{R}' \cdot \mathbf{p}) d^3p \quad (5)$$

(4)式中要求从目标的正、背两面照射取得数据,在雷达成象中,这是不现实的.为此 Lewis 建议将散射体处理成照射和阴影两部份并与散射中心对称<sup>[4]</sup>.经这一处理后,可得

$$\Gamma(\mathbf{p}) = (2\sqrt{\pi} R_t |\rho_+|) / |k[\mathbf{e}_1(\hat{\theta}^i \cdot \mathbf{p}) - \mathbf{e}_2(\hat{R}_t \cdot \mathbf{p})]| \quad (6)$$

跟单站情形一样,实际上我们不可能测量到所有方向,所有频率的  $\mathbf{E}^i$ ,因而不可能测量到全部  $\mathbf{p}$  空间的  $\Gamma(\mathbf{p})$ .同样我们引进窗函数:

$$H(\mathbf{p}) = 1, \mathbf{p} \in D; H(\mathbf{p}) = 0, \mathbf{p} \notin D$$

$D$  为我们能够得到  $\Gamma(\mathbf{p})$  的  $\mathbf{p}$  空间的范围.这样,我们可以得到物体的三维图象为

$$\gamma_d(\mathbf{R}') = (2\pi)^{-3} \int_{\text{whole space}} H(\mathbf{p}) \Gamma(\mathbf{p}) \exp(-i\mathbf{R}' \cdot \mathbf{p}) d^3p = \gamma(\mathbf{R}') \oplus h(\mathbf{R}') \quad (7)$$

虽然(5)式在形式上与 Raz 导出的一样,但它们在物理含义上是截然不同的.前者是测量  $\mathbf{E}^i$  求得的,而  $\mathbf{E}^i$  的方向随着  $\hat{R}_t$  改变而改变,而后者是测量  $\mathbf{E}^s$  的  $\mathbf{E}^i$  方向分量求得的,它忽略了  $\mathbf{E}^s$  的另一个分量.因此我们有理由相信依据文献[3]的理论工作能使成象效果得到改善.

### 3. 计算机模拟

根据(7)式我们有

$$\begin{aligned} \gamma_d(x, y, z) &= (2\pi)^{-3} \int H(p_x, p_y, p_z) T(p_x, p_y, p_z) \exp[-i(xp_x \\ &\quad + yp_y + zp_z)] dp_x dp_y dp_z \end{aligned} \quad (8)$$

将上式离散化,先对  $p_x$  做一维快速傅立叶变换(FFT),然后对  $p_x, p_y$  做二维快速傅立叶变换(DFFT),乘上系数可得到  $\gamma_d(x, y, z)$ .

第一个例子是一个点源,频率范围是 3.75~11.54GHz.观测角是  $3\pi/5 \leq \theta \leq \pi$  (如图2所示).假定物理光学近似成立,我们在物理光学近似下求出散射场,然后用散射场对目标成象,并与依据 S. R. Raz 的不考虑极化方向改变的多站频扫成象进行了比较.图3(a)为用文献[3]的方法得到的  $z=0$  截面内在整数座标点(以 cm 为单位)上的  $\gamma_d(x, y, z)$ .图3(b)为用不考虑极化方向改变的多站频扫成象方法得到的  $z=0$  截面

内在整数坐标点(以 cm 为单位)上的  $r_d(x,y,z)$ 。从结果可以看出, 虽然两种方法都可以分辨出点源在  $(0,0,0)$ , 但从点  $(0,0,0)$  附近的点的值可以看出, 用文献[3]的方法  $r_d(x,y,0) = r_d(y,x,0)$ , 用不考虑极化方向改变的多站频扫成象方法,  $r_d(x,y,0)$  不一定等于  $r_d(y,x,0)$ , 即用不考虑极化方向改变的多站频扫成象方法引起了不对称。

第二个例子为如图 4 所示的 5 个点源, 与第一个例子一样进行了计算机模拟。图 5(a) 为用本文方法得到的  $z = 0$  截面内在整数坐标点(以 cm 为单位)上的  $r_d(x,y,z)$ 。图 5(b) 为用不考虑极化方向改变

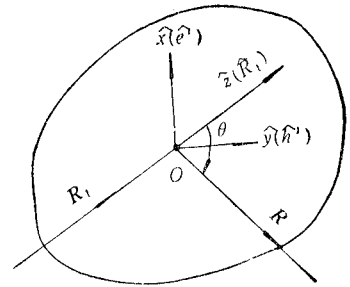


图 2 座标系

0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.8	1.4	0.8	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	1.4	<u>2.1</u>	1.4	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.8	1.4	0.8	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0

(a)

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.7	1.2	0.7	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	1.1	<u>1.7</u>	1.1	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.7	1.2	0.7	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

(b)

图 3

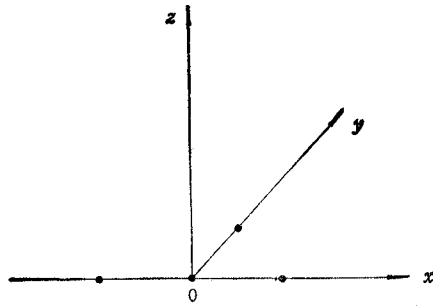


图 4

0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0
0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1
0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1
0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0	0.2	0.0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1
0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.8	1.4	0.8	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	1.2	<u>2.1</u>	1.2	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1
0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.1	0.1	0.7	1.5	0.7	0.1	0.1	0.0	0.2	0.1	0.0
0.0	0.0	0.2	0.0	0.8	1.2	0.7	0.9	1.2	0.9	0.7	1.2	0.8	0.0	0.2	0.0
0.2	0.1	0.1	0.2	1.4	<u>2.1</u>	1.5	1.2	<u>1.4</u>	1.2	1.5	<u>2.1</u>	1.4	0.2	0.1	0.1
0.0	0.0	0.2	0.0	0.8	1.2	0.7	0.9	1.2	0.9	0.7	1.2	0.8	0.0	0.2	0.0
0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.1	0.1	0.7	1.5	0.7	0.1	0.1	0.0	0.2	0.1	0.0
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1	1.2	<u>2.1</u>	1.2	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1
0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.8	1.4	0.8	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0
0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0	0.2	0.0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1
0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1
0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1

(a)

0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0
0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1
0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1
0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.7	1.3	0.7	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0
0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.2	0.1	1.0	<u>1.8</u>	1.0	0.1	0.2	0.0	0.1	0.1	0.1
0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.9	1.6	0.9	0.1	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.1	0.0	0.7	1.1	0.7	0.9	1.3	0.9	0.7	1.1	0.7	0.0	0.1	0.0
0.1	0.1	0.2	0.0	1.1	<u>1.6</u>	1.1	1.0	1.3	1.0	1.1	<u>1.6</u>	1.1	0.0	0.2	0.1
0.0	0.0	0.1	0.0	0.7	1.1	0.7	0.9	1.3	0.9	0.7	1.1	0.7	0.0	0.1	0.0
0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.1	0.9	1.6	0.9	0.1	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0
0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.2	0.1	1.0	<u>1.8</u>	1.0	0.1	0.2	0.0	0.1	0.1	0.1
0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.7	1.3	0.7	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0
0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1
0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1

(b)

图 5

的多站频扫成象方法得到的  $z = 0$  截面内在整数坐标点(以 cm 为单位)上的  $\gamma_d(x, y, z)$ 。从结果可以看出,用本文方法可以分辨出全部 5 个点源,但用不考虑极化方向改变的多站频扫成象方法分辨不出在(0,0,0)的点源。

#### 4. 结论

虽然依据本文和 S.R. Raz 的结果提出的多站频扫成象方法都可以对目标成象,但依据本文结果提出的多站频扫成象方法,成象效果得到了明显的改善。

#### 参 考 文 献

- [1] R.M. Lewis, *IEEE Trans. on AP*, AP-17 (1969)5, 308—314.
- [2] S.R. Raz, *IEEE Trans. on AP*, AP-24(1976)1, 66—70.
- [3] 冯孔豫,张守融,马新才,电子科学学刊,13(1991)2,193—196.

## SIMULATION RESEARCH ABOUT MULTISTATIC FREQUENCY SWEEP IMAGING

Ma Xincai Feng Kongyu

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080)

**Abstract** The multistatic frequency swept imaging of point targets based on the authors' extended Bojarski's identity is simulated with computer and is compared with that based on S. R. Raz's idea. It is demonstrated that the former is evidently better than the later.

**Key words** Electromagnetic scattering; Bojarski's identity; Multistatic frequency swept imaging