

②247-254

# 基于矩阵奇异值分解的频率步进高分辨率毫米波雷达 I/Q 通道误差校正\*

李跃华 李兴国 宁军 汪敏

(南京理工大学毫米波光波近感技术研究所, 江苏, 南京, 210094)

TN958

**摘要** 研究了频率步进高分辨率毫米波雷达一维距离像的成像方法, 讨论了由于 I/Q 正交相干解调通道不平衡对一维距离像成像的影响, 提出了基于矩阵奇异值分解(SVD)法分解出有用信号子空间, 由此求取线性变换, 对正交相干通道不平衡进行校正处理的方法, 并利用目标散射点的回波模型进行了计算机仿真, 其结果表明, 该方法是有用的。

**关键词** 频率步进, 目标成像, 信号检测, 系统误差, 正交 I/Q 通道.

毫米波雷达

## 引言

矩阵奇异值

将毫米波技术应用于雷达技术中可获得很高的距离分辨率、实现大范围的目标搜索, 特别将毫米波与红外等其它技术相结合的复合技术可大大提高雷达探测系统的精度. 因此, 毫米波雷达技术已经成为现代雷达技术研究中人们关注的热点. 国外在 80 年代开始研究, 并已成功地将毫米波雷达技术应用于复合制导中. 英美等国已经研制出使用毫米波雷达技术的主动寻的导引头, 显著提高了目标识别率和制导精度.

本文就频率步进高分辨率毫米波雷达一维距离像成像过程中, 由于 I/Q 正交相干解调通道不平衡所造成的影响, 提出了基于矩阵奇异值分解(SVD)法分解出有用信号子空间, 求取线性变换, 对正交相干通道不平衡进行校正处理的方法, 从而提高一维距离像的质量.

## 1 频率步进毫米波雷达目标距离像的成像方法

由于毫米波雷达目标的一维距离像中包含了目标散射点的个数、分布、径向长度等特征, 这些特征在工程实际中提取较容易, 而目标识别的算法也便于实时化, 因此, 雷达目标一维距离像的成像是高分辨率毫米波雷达实现目标识别和探测的关键技术之一.

根据雷达理论, 雷达可获得的距离分辨率满足如下公式<sup>[1]</sup>:

$$\Delta r_r = c/2B, \quad (1)$$

雷达的距离分辨率取决于发射信号的频带宽度  $B$ . 如果要求  $\Delta r_r$  为 0.3m, 则由式(1)可得频带宽度  $B \geq 500\text{MHz}$ . 说明要获得雷达的高距离分辨率, 发射信号的频带宽度  $B$  应取得很大. 例如若采用简单的窄脉冲信号, 当  $B = 500\text{MHz}$  时, 所需脉冲宽度为:  $\tau = 1/B = 2\text{ns}$ . 这

\* 国防预研基金(编号 95J5.15)资助项目  
稿件收到日期 1998-01-04, 修改稿收到日期 1998-03-30

将要求雷达能发射出大功率的窄脉冲。

频率步进脉冲体制是利用离散的方法逼近大功率窄脉冲。由发射机发射一系列  $n$  个脉宽为  $\tau_T$ 、载频步长为  $\Delta f$  的脉冲串, 由于  $\tau_T > \tau$ , 这样就可以将接收机瞬时带宽取的很小, 则  $(n+1)$  个脉冲的步进总宽度为  $n\Delta f$ , 即可等效替代大功率窄脉冲。在随后的 I/Q 检测中, 可选用相对低速的 A/D 转换器进行回波信号采样, 这样就解决了大功率窄脉冲发射和 A/D 转换器的采样速率问题。根据雷达距离分辨率公式(1)可得:

$$\Delta r_r = c/2B = c/2n\Delta f, \quad (2)$$

通过调整  $n$  和  $\Delta f$ , 即可获得所需  $\Delta r_r$ 。可见频率步进脉冲体制具有良好的适应性。

根据上述频率步进脉冲体制原理, 目标一维距离像成像分为如下几个步骤:

(1) 由发射机发射一系列由  $n$  个脉宽为  $\tau_T$ 、载频步长为  $\Delta f$  组成的脉冲串, 其中, 各载频分别为

$$f_i = f_0 + i\Delta f, \quad (i = 0, \dots, n-1) \quad (3)$$

(2) 对 I、Q 正交双通道的目标回波信号进行采样, 获得一系列数据:

载 频:  $f_0 - n\Delta f, f_0 - (n-1)\Delta f, \dots, f_0, \dots, f_0 + n\Delta f$

回波幅度:  $A_{-n} \quad A_{-(n-1)} \quad A_0 \quad A_n$

相 位:  $\varphi_{-n} \quad \varphi_{-(n-1)} \quad \varphi_0 \quad \varphi_n$

(3) 对每对数据作 DFT<sup>-1</sup> 付氏反变换, 即可获得目标一维距离像。

例如: 设发射信号为:

$$x_i = \begin{cases} B_i \cos(2\pi f_i t + \theta_i), & iT_2 \leq t \leq iT_2 + T_1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

则目标回波信号为:

$$y_i = \begin{cases} B_i \cos\{2\pi f_i [t - \tau(t)] + \theta_i\}, & iT_2 + \tau(t) \leq t \leq iT_2 + T_1 + \tau(t) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

根据图 1 所示进行正交 I/Q 检波:

本振信号为:

$$Z_i = B \cos(2\pi f_i t + \theta_i), \quad iT_2 \leq t \leq iT_2 + T_1, \quad (6)$$

混频后的输出为:

$$m_i(t) = \begin{cases} A_i \cos[-2\pi f_i r(t)], & iT_2 + \tau(t) \leq t \leq iT_2 + T_1 + \tau(t) \\ 0, & \text{其它;} \end{cases} \quad (7)$$

通过理想的正交双通道 I/Q 处理后有:

$$G_i = A_i (\cos \varphi_i + j \sin \varphi_i), \quad (8)$$

其中,  $A_i$  为混频输出信号幅度。

$$\varphi = -2\pi(f_0 + i\Delta f)\left[\frac{2R}{C} - \frac{2V_r}{C}\left(iT_2 + \frac{T_1}{2} + \frac{2R}{C}\right)\right]; \quad (9)$$

式(9)中  $T_2$  为脉冲重复周期,  $T_1$  为脉冲宽度,  $V_r$  为雷达与目标的相对运动速度. 经 DFT<sup>-1</sup> 付氏反变换, 则点目标的回波波形函数为<sup>[1]</sup>

$$H_k = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} G_i \exp\left(j \frac{2\pi}{n} ki\right), \quad (10)$$

则回波波形的包络为  $|H_k|$ .

设点目标相对于雷达的距离为  $R=2000\text{m}$ ,  $f_0=30\text{GHz}$ ,  $\Delta f=10\text{MHz}$ ,  $T_1=100\text{ns}$ ,  $T_2=20\mu\text{s}$ ,  $n=128$ , 雷达与目标的相对运动速度  $V_r=20\text{m/s}$  时, 根据式(10)可得点目标的距离像如图 2 所示, 由图 2 可见, 目标散点相对位于  $n=50$  处.

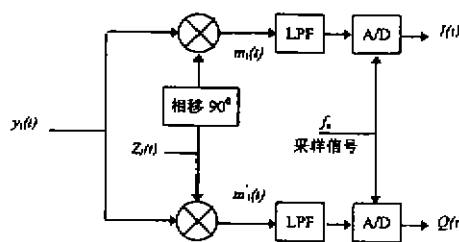


图 1 正交 I/Q 通道

Fig. 1 Block diagram of quadrature I/Q channels

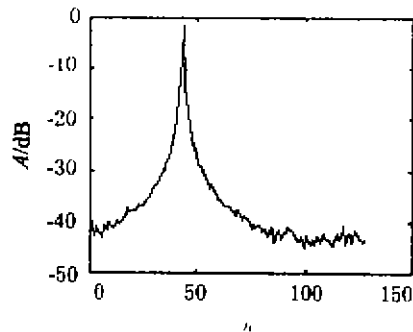


图 2 理想 I/Q 检测的距离像

Fig. 2 Range profiles of ideal I/Q channels

## 2 频率步进毫米波雷达正交解调误差的影响

为了能正确合成一维距离像, 实现图 1 所示的 I/Q 正交检波的一个基本条件就是 I/Q 两通道在幅度和相位上必须保持平衡<sup>[2]</sup>. 这对工程的实现提出很高的要求, 由于器件制造工艺等方面的原因, 在实际系统中配备特性完全一致的器件模块非常困难. 因此, 在实际正交解调过程中, 将不可避免的存在 I/Q 检波通道的不平衡误差, 成为影响高分辨率毫米波雷达的一维距离像的成像质量的重要因素. 根据图 1 所示的 I/Q 正交检波通道, 影响一维距离像成像的原因可能有<sup>[3,4]</sup>: (1) I/Q 通道间的相对误差; (2) 通道间的增益误差; (3) 本振信号泄漏; (4) I/Q 通道中的直流偏置.

根据上述, 对每个步进频率, 理想的 I/Q 通道的输出分别为:

$$I = A_i \cos \varphi, \quad (11)$$

$$Q = A_i \sin \varphi, \quad (12)$$

为了便于讨论 I/Q 通道不平衡对一维距离像成像的影响, 设:

$$I = A_i \cos \varphi \quad (13)$$

$$Q = (A_i + \Delta A_i) \sin(\varphi + \Delta \varphi), \quad (14)$$

通过正交双通道 I/Q 处理后有:

$$G_r = A_r \cos \varphi_r + j(A_r + \Delta A_r) \sin(\varphi_r + \Delta \varphi_r), \quad (15)$$

设点目标相对于雷达的距离为  $R=2000\text{m}$ ,  $f_0=30\text{GHz}$ ,  $\Delta f=10\text{MHz}$ ,  $T_1=100\text{ns}$ ,  $T_2=20\mu\text{s}$ ,  $n=128$ . 根据式(10)可得点目标的距离像, 其中图 3(a)为  $\Delta A_r=0, \Delta \varphi_r=4^\circ$ 、图 3(b)为  $\Delta A_r=1.5\text{dB}, \Delta \varphi_r=0$  仿真结果.

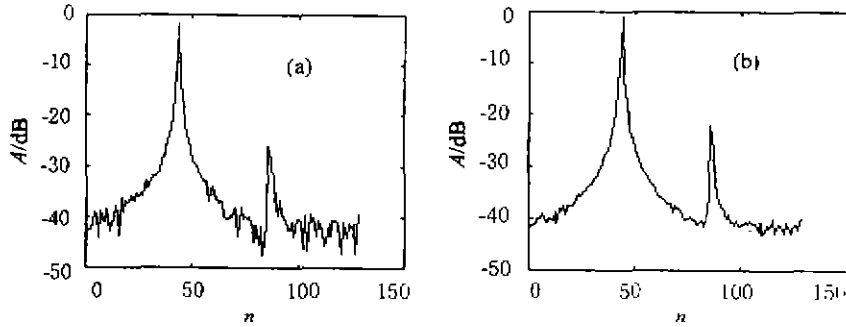


图 3 Q 通道存在幅度相位误差对距离像的影响

(a)  $\Delta A_r=0, \Delta \varphi_r=4^\circ$  (b)  $\Delta A_r=1.5\text{dB}, \Delta \varphi_r=0$

Fig. 3 Effect of error of Q channel on range profile

同样可设:

$$I = (A_r + \Delta A_r) \cos(\varphi_r + \Delta \varphi_r), \quad (16)$$

$$Q = A_r \sin \varphi_r, \quad (17)$$

通过正交双通道 I/Q 处理后有:

$$G_r = (A_r + \Delta A_r) \cos(\varphi_r + \Delta \varphi_r) + j A_r \sin \varphi_r. \quad (18)$$

设点目标相对于雷达的距离为  $R=2000\text{m}$ ,  $f_0=30\text{GHz}$ ,  $\Delta f=10\text{MHz}$ ,  $T_1=100\text{ns}$ ,  $T_2=20\mu\text{s}$ ,  $n=128$ . 根据式(10)可得点目标的距离像, 其中图 4(a)为  $\Delta A_r=0, \Delta \varphi_r=4^\circ$ 、图 4(b)为  $\Delta A_r=1.5\text{dB}, \Delta \varphi_r=0$  仿真结果.

图 5 为 I/Q 两个通道幅度相位平衡, 但出现 3dB 直流偏置对距离像所造成的影响.

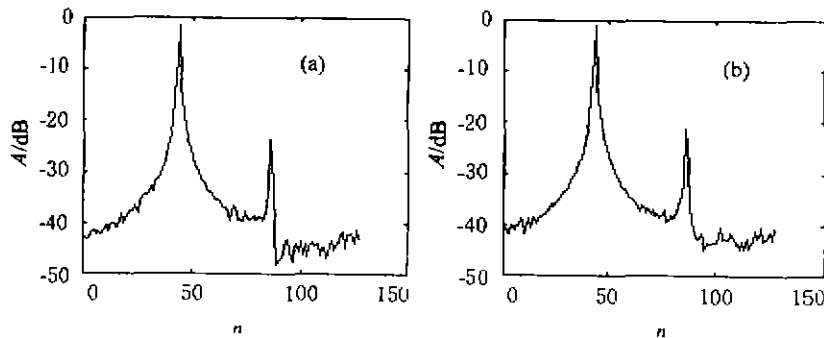


图 4 I 通道存在幅度相位误差对距离像的影响

(a)  $\Delta A_r=0, \Delta \varphi_r=4^\circ$  (b)  $\Delta A_r=1.5\text{dB}, \Delta \varphi_r=0$

Fig. 4 Effect of error of I channel on range profile

由图 3~图 5 可见, 由于 I/Q 两通道的不平衡、I/Q 通道中的直流偏置的影响, 虽然没有影响目标回波的相对位置, 但在实际正交解调过程中, 都将影响 I/Q 检波通道的回波采样精度, 产生镜像信号, 结果在一维距离像中出现假目标的成像(约在  $n=88$ ), 其中图 5 中还出现了零位置的距离像. 实际上真目标的回波峰值也有所下降, 这些都将影响雷达的目标识别的精度.

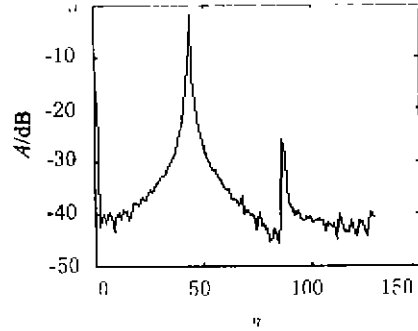


图 5 直流偏置对距离像的影响

Fig. 5 Effect of DC offset on range profile

### 3 频率步进毫米波雷达正交解调误差的校正

设 I/Q 通道的采样点数为  $N$ , 构造如下采样数据矩阵:

$$\mathbf{H}^T = \begin{bmatrix} I_1 & I_2 & \cdots & I_N \\ Q_1 & Q_2 & \cdots & Q_N \end{bmatrix}^T, \quad (19)$$

这样, I/Q 通道误差的影响可以通过 I、Q 采样值的自相关矩阵  $\mathbf{R}$  进行研究. 根据统计理论有:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{II} & R_{IQ} \\ R_{QI} & R_{QQ} \end{bmatrix} = \mathbf{H}^T \mathbf{H}, \quad (20)$$

由式(11)和(12), 对于理想的正交 I/Q 通道, 矩阵  $\mathbf{R}$  的各个元素应该满足如下关系:

$$R_{IQ} = 0, R_{QI} = 0, R_{II} = R_{QQ};$$

但由于 I/Q 通道特性的不一致, I/Q 通道间存在相位误差和增益误差, 正交性被破坏, 矩阵  $\mathbf{R}$  的各个元素表现为:

$$R_{IQ} \neq 0, R_{QI} \neq 0, R_{II} \neq R_{QQ},$$

因此, 对于 I/Q 通道间相位误差和增益误差的校正即可看成是寻找一种变换  $\mathbf{T}$ , 对采样数据矩阵  $\mathbf{H}$  进行变换, 使  $\mathbf{H}_0 = \mathbf{H}\mathbf{T}$ , 从而使 I、Q 采样值的自相关矩阵转化为:

$$\mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

根据矩阵理论<sup>[5]</sup>, 有如下定理:

**定理** 对于任意一个  $m \times n$  维的复数矩阵  $\mathbf{A}$ , 则分别存在一个  $m \times m$  维和一个  $n \times n$  维酉矩阵  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{V}$ , 使得:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^H, \quad (22)$$

其中: 酉矩阵  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{V}$  满足:

$$U^{-1} = U^H, V^{-1} = V^H, \quad (23)$$

对于实的酉矩阵有:  $U^{-1} = U^T, V^{-1} = V^T$  为正交阵,  $\Sigma$  为一个  $m \times n$  维的对角阵,

$$\Sigma = \begin{bmatrix} S & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (24)$$

其中:

$$S = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_h), \quad (25)$$

$\sigma_i, (i=1, \dots, h)$  为矩阵  $A$  的奇异值, 且有:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_h \geq 0, h = \min(m, n)$$

根据上述定理, 对采样数据矩阵  $H$  进行 SVD 解奇异值分解有:

$$H = U \Sigma V^T, \quad (26)$$

于是有:

$$R = H^T H = (U \Sigma V^T)^T (U \Sigma V^T) = V \Sigma^T (U^T U) \Sigma V^T, \quad (27)$$

由式(24)和(25)有:  $(U^T U) = I, \Sigma^T \Sigma = S^T S$ , 则式(27)变为:

$$R = V \Sigma^T \Sigma V^T = V S^T S V^T, \quad (28)$$

设线性变换  $T$ , 对采样数据矩阵  $H$  作变换有:

$$H_0 = HT, \quad (29)$$

对 I/Q 通道相位误差和增益误差进行正交误差校正的最终目的是为了使采样数据矩阵  $H_0$  的相关矩阵  $R_0 = I$ . 于是:

$$R_0 = H_0^T H_0 = (HT)^T (HT) = T^T H^T H T, \quad (30)$$

将式(30)代入式(28)有:

$$R_0 = H_0^T H_0 = T^T V S^T S V^T T = I, \quad (31)$$

即可求出线性变换:

$$T = V S^{-1} V^T. \quad (32)$$

设点目标相对于雷达的距离为  $R = 2000\text{m}$ ,  $f_0 = 30\text{GHz}$ ,  $\Delta f = 10\text{MHz}$ ,  $T_1 = 100\text{ns}$ ,  $T_2 = 20\mu\text{s}$ ,  $n = 128$ . 根据图 1 所示结构, 并在<sup>[2]</sup>

$$S_i = \left( i T_2 + \frac{T_1}{2} + \frac{2R}{C} \right) \quad (33)$$

时刻, 对每个步进频率的回波信号进行采样, 分别组成采样数据矩阵  $H$ . 当 Q 通道存在幅度和相位不平衡误差分别为:  $\Delta\varphi = 4^\circ$  和  $\Delta A_i = 1.5\text{dB}$  时, 可计算出自相关矩阵  $R$ :

$$R = \begin{bmatrix} 64.25 & 10.2442 \\ 10.2442 & 91.6417 \end{bmatrix},$$

可见, 由于 I/Q 通道的不平衡, 使自相关矩阵  $R$  中因素间出现相干, 造成镜频信号在目标距离像中产生的假像, 图 6(a), 为校正前的距离像, 其中出现了假像.

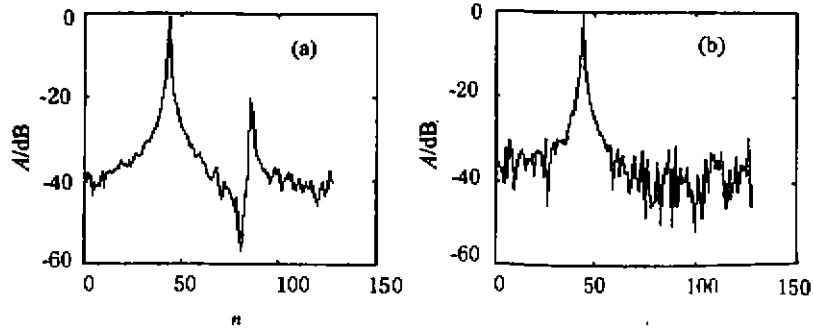


图 6 校正前后的距离像  
 (a) 校正前的距离像 (b) 校正后的距离像  
 Fig. 6 Range profiles before and after correction  
 (a) before correction (b) after correction

根据式(32), 我们可以求出线性变换:

$$T = \begin{bmatrix} 0.1256 & -0.0077 \\ -0.0077 & 0.1051 \end{bmatrix}$$

对采样数据矩阵  $H$  进行变换, 求出  $H_0 = HT$ , 对  $H_0$  进行同样的处理后, 可获得图 6(b) 所示的校正后的距离像. 由图 6(b) 可见, 消除了镜频信号产生的假像. 此时自相关矩阵  $R_0$  为:

$$R_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

以上讨论了毫米波高分辨率频率步进雷达目标距离像的成像方法. 由于保持 I/Q 两个通道在幅度和相位上完全平衡的要求在工程上实现困难, 即实际的 I/Q 通道不平衡总是存在的, 文中分析了频率步进雷达正交解调中由于 I/Q 两通道的不平衡, I/Q 通道中的直流偏置等对毫米波频率步进高分辨率雷达一维距离像成像的影响, 提出了基于矩阵的 SVD 奇异值分解法求取线性变换, 对频率步进雷达正交解调误差进行校正的解决办法, 仿真结果表明采用该方法用于 I/Q 两通道的不平衡校正可行和有效的, 它可进一步提高雷达目标识别的精度.

## REFERENCES

- 1 Weher D R. *High Resolution Radar*, Artech House, 1987; 5~180
- 2 JE L Y. *Principles of Modern Radar*, Van Nostrand Reinhold Company (桌容邦等译, 现代雷达原理, 北京: 电子工业出版社, 1991, 89~98)
- 3 Sinsky A I, et al. *IEEE Trans.*, 1984, AES(10); 880~889
- 4 Wang Zheng-Rong, et al. *Acta Electronica Sinica* (王振容等, 电子学报), 1996, 24(12); 82~90
- 5 ZHANG Xian-Da. *Modern Signal Processing*, Beijing: Tsinghua University Press (张贤达, 现代信号处理, 北京: 清华大学出版社), 1995; 68~79

**ERROR CORRECTION OF QUADRATURE COHERENT I/Q CHANNELS  
OF STEP-FREQUENCY HIGH-RESOLUTION MMW  
RADAR BASED ON SVD OF MATRIX\***

LI Yue-Hua LI Xin-Guo NING Jun WANG Min

(Research Institute of MMW & Light Wave Near-sensing Technology,  
Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** The method of 1-D imaging for frequency-stepping high range resolution MMW rader was studied. The error of a quadrature coherent I/Q channels was discussed. The error-correcting method with SVD of matrix was presented. By use of the echo model, the computer simulation was carried out. The simulation results show that the method is effective.

**Key words** frequency stepping, target imaging, signal detection, system error, quadrature I and Q channels

---

\* The project supported by the Preliminary Research Foundation in National Defence  
Received 1998-01-04, revised 1998-03-30