

调频步进雷达扩展目标高分辨距离像分析

陈行勇, 魏奎章, 黎 湘, 郭桂蓉

(国防科技大学电子科学与工程学院空间电子信息技术研究所, 湖南长沙 410073)

摘 要: 本文首先对扩展目标的一维距离像进行了离散建模; 然后给出了扩展目标调频步进雷达回波信号的数学模型, 证明了调频步进雷达相参合成扩展目标一维距离像原理; 文章分析了目标运动对合成距离像的影响, 推导了运动目标合成距离像的距离单元走动计算公式, 给出了运动目标一维距离像二次相位误差补偿的速度临界值; 最后给出了计算机仿真, 证明了本文的结论。

关键词: 调频步进雷达; 一维距离像; 多普勒效应; 相位因子

中图分类号: TN9571. 52 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2005) 09 1599-04

Analysis of Achieving High Resolution Profile of Extended Target for Stepped Chirp Radar

CHEN Hang yong, WEI Xi zhang, LI Xiang, GUO Gui rong

(Research Institute of Space Electronics Information technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: A discrete model is firstly set up for High Resolution Profile of an extended target; then the paper presents the math model of echo signal from an extended target for a Stepped Chirp Radar, and proves the principle of synthesizing a HRRP of an extended target by phase coherent integration. The paper studies the effect of motion status on the synthesized HRRP, derives a equation to calculate the shift of HRRP for motion target, and gives a critical velocity for compensating quadratic phase error for a HRRP of a motion target. At last, the paper presents a computer emulation of synthesizing HRRP and proves the conclusion of the paper.

Key words: stepped chirp radar; high range resolution profile; Doppler effect; phase factor

1 引言

高分辨距离像(High Range Resolution Profile, HRRP)能够提供目标的距离向几何结构信息, 基于 HRRP 的识别方法成为现代战争环境感知和目标识别的主流。采用合成带宽信号可以获得高分辨距离像, 在脉冲串合成宽带信号中, 调频步进信号是在频率步进信号和线性调频信号基础上提出来的, 它能弥补二者的缺陷, 可以具有较大的跳频间隔, 合成同样的带宽需要较少的跳频点数, 这对运动补偿的实现带来极大的好处, 同时单个脉冲的距离分辨力也较高, 有利于多目标分辨和分选。调频步进雷达合成高分辨距离像是高分辨雷达信号的一个重要研究方向。国防科技大学空间电子信息技术研究所已经使用调频步进信号获得了地面目标的高分辨距离像, 用于识别坦克车和轮式车等目标。

美国海军研究生学院(Naval Postgraduate School)研究了步进频率雷达信号处理和高分辨距离像的合成^[1, 2]; 在文献[3]中, H. Schimpf 等基于 MEMPHIS 毫米波雷达研究了调频步进雷达合成带宽提高分辨力的原理; 国内北京理工大学的学者

研究了调频步进信号处理^[4, 5], 包括调频步进雷达点目标回波信号的多普勒效应和目标运动对子脉冲压缩和合成距离高分辨的影响等; 文献[6]研究了调频步进信号的模糊函数; 文献[7]研究了目标运动对步进频率毫米波雷达合成距离像的影响。本文将研究调频步进雷达相参合成扩展目标一维距离像。

2 相参合成距离像原理

2.1 调频步进雷达信号形式

调频步进雷达信号的时域表达式为^[4]:

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} u_1(t - iT_r) \cdot e^{j2\pi(f_0 + i\Delta f)t}$$
$$= \frac{1}{\sqrt{N\tau}} \sum_{i=0}^{N-1} \text{rect}\left[\frac{t - \frac{T}{2} - iT_r}{\tau}\right] \cdot e^{j\pi K(t - iT_r)^2} \cdot e^{j2\pi(f_0 + i\Delta f)t} \quad (1)$$

其中 $u_1(t) = 1/\sqrt{\tau} \text{rect}((t - \tau/2)/\tau) \cdot e^{j\pi Kt^2}$ 为 chirp 子脉冲, $K = \Delta f/\tau$ 为 chirp 子脉冲的调频斜率, T_r 为脉冲重复周期, $i \cdot \Delta f$ 为第 i 个脉冲的载频增量, f_0 为发射载频的基频分量, N 为矩形子脉冲个数。调频步进雷达信号的频率变化规律如图 1。

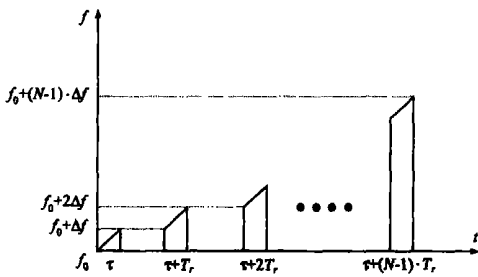


图 1 调频步进雷达信号的频率

2.2 目标模型

设扩展目标后向电磁散射强度在径向的投影连续分布曲线为 $h(r)$, r 为目标径向尺寸(图 2), 由于雷达分辨单元 Δr 有一定宽度, 调频步进雷达合成距离像 $h(n)$ 为 $h(r)$ 的近似. 以分辨单元将目标近似划分为等距点目标沿径向排列, 可建立目标径向散射特性的近似模型. 当分辨单元趋近于零时, 这种模型表征了目标散射特性沿径向的精确分布, 如图 2 所示, 将目标距离像近似等效为一离散线性系统的冲激响应, 记为 $h(n)$ ($n = 0, 1, 2, \dots, N-1$), 相参合成距离像的原理就是由 $h(n)$ 的傅里叶变换恢复 $h(n)$.

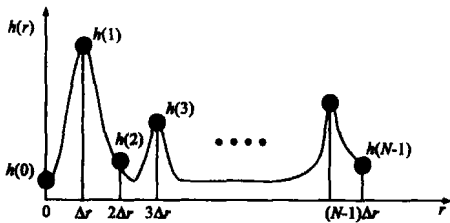


图 2 扩展目标的一维距离像

2.3 相参合成距离像原理

假设目标相对雷达无径向运动, 不考虑目标各强散射中心的相互电磁作用, 则第 $i+1$ 个脉冲的回波信号为

$$y_i(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N\tau}} \sum_{n=0}^{N-1} h(n) u(t - \tau_m) = \frac{1}{\sqrt{N\tau}} \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left[\frac{t - \tau_{in} - \frac{T}{2} - iT_r}{\tau} \right] h(n) e^{j2\pi k(t - \tau_m - iT_r)^2} \cdot e^{j2\pi(f_0 + i\Delta f)(t - \tau_{in} - iT_r)}, & iT_r + \tau_{i0} \leq t \leq iT_r + \tau_{i(N-1)} + \tau \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

其中 τ_m ($n = 0, 1, \dots, N-1, i = 0, 1, \dots, N-1$) 是第 $i+1$ 个脉冲雷达波照射第 $n+1$ 个强散射中心的回波相对于照射到第 1 个强散射中心的延迟, 将回波信号与相参本振信号混频输出为

$$u_i(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N\tau}} \sum_{n=0}^{N-1} A_{in} \text{rect} \left[\frac{t - \tau_{in} - \frac{T}{2} - iT_r}{\tau} \right] h(n) e^{j2\pi k(t - \tau_m - iT_r)^2} \cdot e^{-j2\pi(f_0 + i\Delta f)\tau_{in}}, & iT_r + \tau_{i0} \leq t \leq iT_r + \tau_{i(N-1)} + \tau \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

假设混频后的视频回波幅度不变, 即 $A_{in} = 1$, 由式(3)可以看出, 调频步进雷达的视频回波可以分解为两部分, 一是 Chirp

因子 $e^{j2\pi k(t - \tau_m - iT_r)^2}$; 二是步进频率因子 $e^{-j2\pi(f_0 + i\Delta f)\tau_{in}}$. 将发射信号的幅度归一化, 对式(3)在 $iT_r + \tau_s$ ($\tau_{i0} \leq \tau_s \leq \tau_{i(N-1)}$) 采样得

$$u_i(iT_r + \tau_s) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi k(\tau_s - \tau_m)^2} \cdot h(n) e^{-j2\pi(f_0 + i\Delta f)\tau_{in}} \quad (4)$$

将 $\tau_{in} = 2n\Delta r / c = 2n \cdot (c / 2N\Delta f) \cdot 1/c = n/N\Delta f$ 代入上式可得

$$U[i] = u_i(iT_r + \tau_s) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) \cdot e^{-\frac{j2\pi \cdot 2f_0 \Delta r}{c} \cdot n} W_N^{(i+P)n} \approx \sum_{n=0}^{N-1} h_1(n) \cdot W_N^{(i+P)n} = H_1[((i-P))_N] \quad (5)$$

其中 $W_N = e^{-j2\pi PN}$, $P = [N \cdot (2f_0\Delta r / c - [2f_0\Delta r / c])]$, $[\cdot]$ 表示取整运算, $H_1[((i-P))_N]$ 表示对 $H_1[i]$ 循环右移位 P 点, 对回波脉冲的采样点列 $U[i]$ 求 IDFT 后取模可得

$$h[((n-P))_N] = |h_1[((n-P))_N]| = | \text{IDFT}(U[i]) | \quad (6)$$

式(6)表明对一个扫描周期内的回波脉冲的采样点列计算 IDFT 后取模, 并循环左移位 P 点即得目标一维距离像 $h(n)$.

其物理意义是: 目标的一维距离像 $h(n)$ 可以看成是沿目标径向以不同频率的散射中心谐波分布曲线的叠加, 对于大的 i 值, $|U[i]|$ 越大, 说明散射中心沿目标径向分布变化越剧烈. 对一个扫描周期的 N 个脉冲采样相当于对一维距离像点列的离散时间傅里叶变换在一周期内等间隔采样, 当采样点数 N 大于一维距离像有限长点列个数 $(c\tau/2) / (c/2N\Delta f)$ 时可避免时域混叠, 即 $\tau\Delta f \leq 1$, 称为紧约束条件. 若 $\tau\Delta f < 1$, 则对应频域过采样, $U[i]$ 相当于 $h(n)$ 尾段补零的 DFT, 此时距离像窗包含冗余信息, 由于循环移位使目标距离像在距离像窗内分裂, 本文假定 $\tau\Delta f = 1$.

3 目标运动的多普勒效应

3.1 回波数学模型

设目标第 $n+1$ 个强散射中心在径向靠近雷达以速度 v_n 作匀速运动, $t = 0$ 时刻目标第 $n+1$ 个强散射中心距雷达的距离为 $R_n = R_0 + n\Delta r$, 则回波信号经混频后的视频输出为

$$u(t) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect} \left[\frac{t - \frac{2(R_n - v_n(iT_r + t))}{c + v_n} - \frac{T}{2} - iT_r}{\tau} \right] h(n) e^{j2\pi k(t - \frac{2(R_n - v_n)}{c + v_n} - iT_r)^2} \cdot e^{-j2\pi(f_0 + i\Delta f) \frac{2(R_n - v_n)}{c + v_n}}, & iT_r + \tau_{i0} \leq t \leq iT_r + \tau_{i(N-1)} + \tau \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

将视频输出的幅度因子归一化, 并在 $iT_r + t_s$ 时刻采样得

$$U[i] = u(iT_r + t_s) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{j2\pi k(t_s - \frac{2(R_n - v_n(iT_r + t_s))}{c + v_n})^2} \cdot e^{-j2\pi(f_0 + i\Delta f) \frac{2(R_n - v_n(iT_r + t_s))}{c + v_n}} \quad (8)$$

3.2 输出相位因子的构成

为分析目标运动对距离像的影响, 假设 $v_n = v$. 对运动目标视频回波脉冲的采样相当于对一维像点列的离散时间傅里

叶变换在一个周期内的频域非等间隔采样, 将相位因子按频域因子的次幂分解, 利用离散傅里叶变换的循环移位理论可以研究相位因子对合成距离像的影响。

3.2.1 频率步进相位因子 频率步进相位因子为

$$\theta_{in} = -2\pi(f_0 + i\Delta f) \frac{2fR_n - v(iT_r + t_s)}{c+v} = -\frac{4\pi}{c+v}(f_0 + i\Delta f)[R_n - v(iT_r + t_s)] \quad (9)$$

令 $\theta_{in} = -2\pi(ni/N + \Delta\theta_{in}^{(0)} + \Delta\theta_{in}^{(1)} \cdot i + \Delta\theta_{in}^{(2)} \cdot i^2)$, 其中 $\Delta\theta_{in}^{(0)}$ 、 $\Delta\theta_{in}^{(1)}$ 和 $\Delta\theta_{in}^{(2)}$ 分别称为常数项、一次相位因子和二次相位因子, 则

$$\Delta\theta_{in}^{(0)} = \frac{2(f_0R_0 - f_0vt_s + if_0\Delta r)}{c+v} \quad (10)$$

$$\Delta\theta_{in}^{(1)} = \frac{2}{c+v}(\Delta fR_0 - f_0T_r v - \Delta fvt_s) \quad (11)$$

$$\Delta\theta_{in}^{(2)} = \frac{-2v\Delta fT_r}{c+v} \quad (12)$$

3.2.2 线性调频相位因子 线性调频相位因子为

$$\vartheta_{in} = 2\pi k \left[t_s - \frac{2R_n - 2v(iT_r + t_s)}{c+v} \right]^2 = \frac{2\pi k}{(c+v)^2} [R_0 + n\Delta r - v(iT_r + t_s)]^2 \quad (13)$$

令 $\vartheta_{in} = -2\pi(\vartheta_{in0} \cdot ni + \Delta\vartheta_{in}^{(0)} + \Delta\vartheta_{in}^{(1)} \cdot i + \Delta\vartheta_{in}^{(2)} \cdot i^2)$, ϑ_{in0} 为时频交叉因子, $\Delta\vartheta_{in}^{(0)}$ 、 $\Delta\vartheta_{in}^{(1)}$ 和 $\Delta\vartheta_{in}^{(2)}$ 分别称为常数项、一次相位因子和二次相位因子, 则

$$\vartheta_{in0} = \frac{8k\Delta nT_r}{(c+v)^2} \quad (14)$$

$$\Delta\vartheta_{in}^{(0)} = \frac{-k[(c+3v)t_s - 2R_0 - 2n\Delta r]^2}{(c+v)^2} \quad (15)$$

$$\Delta\vartheta_{in}^{(1)} = \frac{-4kT_r v[(c+3v)t_s - 2R_0]}{(c+v)^2} \quad (16)$$

$$\Delta\vartheta_{in}^{(2)} = \frac{-4kT_r^2 v^2}{(c+v)^2} \quad (17)$$

3.3 相位因子对相参合成距离像的影响

3.3.1 常数项 常数项 $\Delta\theta_{in}^{(0)}$ 和 $\Delta\vartheta_{in}^{(0)}$, 不包含频域因子 i , 相当于对 $h(n)$ 的相位加权, 对 $h(n)$ 的位置和幅度无影响, 采样点列求 IDFT 后取模可消除常数项对一维距离像影响。

3.3.2 一次相位因子 一次相位因子 $\Delta\theta_{in}^{(1)}$ 和 $\Delta\vartheta_{in}^{(1)}$ 的作用相当于频域移位采样, 使回波脉冲采样求 IDFT 后得到的 $h(n)$ 循环移位 L 单元, 对一维距离像形状无影响, 移位点数 L 由下式计算

$$L = [N \cdot (\Delta\theta_{in}^{(1)} + \Delta\vartheta_{in}^{(1)} - [\Delta\theta_{in}^{(1)} + \Delta\vartheta_{in}^{(1)}])] \quad (18)$$

上式也即走动的距离单元数的计算公式。

3.3.3 二次相位因子和时频交叉因子 二次相位因子 $\Delta\theta_{in}^{(2)}$ 和 $\Delta\vartheta_{in}^{(2)}$ 以及时频交叉因子 ϑ_{in0} 的作用相当于频域非等间隔采样, 使采样点列求 IDFT 后获得的 $h(n)$ 产生移位和幅度变化, 对一维距离像位置和形状都有影响。令 $\lambda = T_r/\tau$, 则 $\vartheta_{in0} = 8k\Delta r v T_r / (c+v)^2 \approx 8k\Delta r v T_r / c^2 = \lambda \cdot (4/N) \cdot (v/c)$, 由于脉冲重复频率受检测概率限制, 通常可认为 $(v/c) \cdot \lambda \ll 1$, 即 $\vartheta_{in0} \ll 1/N$, 故 ϑ_{in0} 的影响通常可以忽略。若要求综合脉冲最大二次相位偏移小于 $\pi/2$, 则 $|\Delta\theta_{in}^{(2)} + \Delta\vartheta_{in}^{(2)}| \cdot N^2 = (2\lambda v/c + 1)$

$$|\Delta\theta_{in}^{(2)}| \cdot N^2 \leq 1/4, \text{ 即}$$

$$v \leq v_{\max} = \frac{1}{1 + 2\lambda v/c} \cdot \frac{c}{8N^2\Delta f T_r} \approx \frac{c}{8N^2\Delta f T_r} \quad (19)$$

上式说明调频步进雷达运动补偿的速度临界值与频率步进雷达近似相同。

4 仿真计算和结果分析

4.1 系统模拟

设目标模型为: 目标由顺序相距 $2\Delta r$, $2\Delta r$ 和 $12\Delta r$ 的四个强散射点构成, 其归一化散射强度之比为 1:5:3:2, 第一个强散射点距离雷达的径向距离为 2km; 雷达信号参数为: 发射频率 $f_0 = 10\text{GHz}$, chip 子脉冲带宽 $B_c = 8\text{MHz}$, $\tau = 125\text{ns}$, $\Delta f = 8\text{MHz}$, $N = 32$, $T_r = 1.5\mu\text{s}$, $t_s = \tau/2$ 。由以上参数可得相参合成距离分辨率为 $\Delta r = c/(2N\Delta f) = 0.59\text{m}$ 。不考虑杂波影响和采样的幅度损失, 以下分析目标运动时各相位因子对合成距离像的影响。

4.2 目标径向运动对合成距离像的影响

4.2.1 交叉相位因子和常数项 $v = 300\text{m/s}$ 时的交叉相位因子对合成距离像几乎无影响(图 3), 证明了本文的理论分析结果。图 4 证明了常数项对合成距离像无影响。

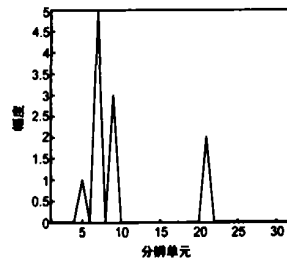


图 3 交叉相位因子影响 (v=300m/s)

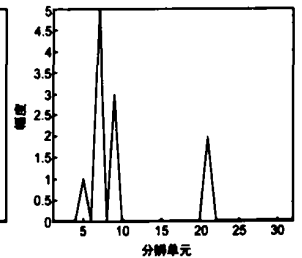


图 4 常数项影响 (v=300m/s)

4.2.2 一次相位因子 一次相位因子主要引起运动目标合成距离像的移位(图 5), 但由于移位因子并非恰好是整数, 对 $U[i]$ 求 IDFT 导致实际距离像幅度有较小的衰减, 当 v 分别等于 30m/s 和 100m/s 时, 由式(18)计算得 L 分别等于 11 和 8, 与仿真结果相同, 可以得出结论: 一次相位引起的幅度衰减较小, 主要产生移位, 由于循环移位具有周期性, 距离走动单元对速度具有周期性。

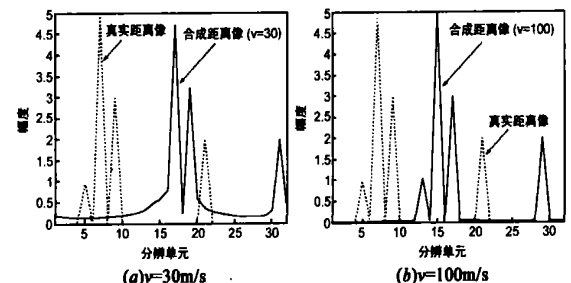


图 5 一次相位因子的影响

4.2.3 二次相位因子 二次相位因子对运动目标合成距离像的影响包括距离像移位和幅度变化(图 6), 当 $v = 30\text{m/s}$, 最高峰衰减 4%; 当 $v = 100\text{m/s}$, 最高峰已衰减 10%。由此得出结

论:二次相位产生的移位较小,主要是距离像最高峰衰减和其他强散射点幅度变化。

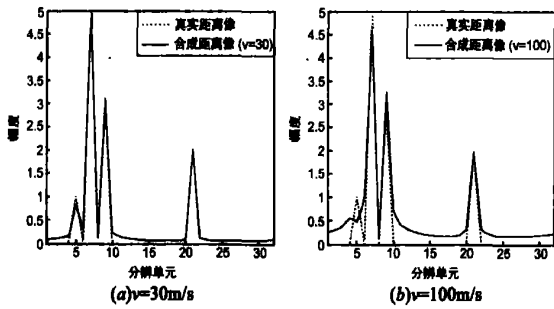


图 6 二次相位因子的影响

4.2.4 综合影响分析 相位因子对合成距离像的综合影响包括移位和变形(图 7),移位和变形关于速度具有周期性,距离像最高峰幅度一定衰减,而次峰幅度可能增大,形成伪峰。

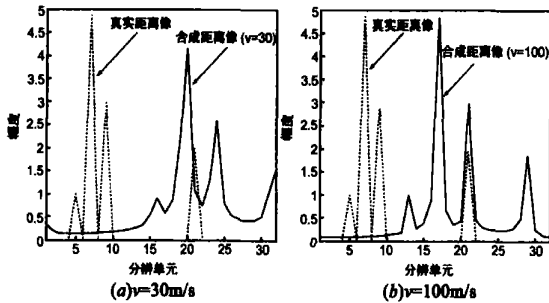


图 7 相位因子的综合影响

5 结束语

调频步进雷达是一种新的高分辨雷达体制,对其信号处理和合成距离像研究还处在初级阶段,本文研究了调频步进雷达合成扩展目标距离像原理和多普勒效应,在以后的研究中重点研究从数字信号处理角度对整个成像过程(包括脉压和加窗)的建模分析,另一个重要的研究方向是利用模糊函数设计新的高分辨雷达的复合波形。

参考文献:

- [1] Mun, KokLeog. Stepped Frequency Imaging Radar Simulation[R]. AD-A379137, Monterey, California: Naval Postgraduate School, March 2000.
- [2] Abraham Paulose. High Radar Range Resolution with the Step Frequency

Waveform[R]. AD-A284611, Monterey, California: Naval Postgraduate School, June 1994.

- [3] H Schimpf, A Wahlen. High range resolution by means of synthetic bandwidth generated by frequency stepped chirps[J]. IEE Electronics Letters Online, 2003, 39(18): 1-2.
- [4] 龙腾,毛二可,等.调频步进雷达信号分析与处理[J].电子学报,1998,26(12):84-88.
LONG Teng, MAO Er ke, et al. Analysis and processing of modulated frequency stepped radar signal[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(12): 84-88. (Chinese Source)
- [5] 雷文,龙腾,等.调频步进雷达运动目标信号处理的新方法[J].电子学报,2000,28(12):34-37.
LEI Wen, LONG Teng, et al. Novel signal processing methods for moving targets in stepped frequency modulated radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(12): 34-37. (Chinese Source)
- [6] 贺志毅,汤斌,等.脉内调频、脉间步进跳频雷达信号的模糊函数[J].电子学报,2000,31(7):1118-1120.
HE Zhi yi, TANG Bin, et al. The ambiguity function of intrapulse Chirp and inter pulse stepped frequency signal[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 31(7): 1118-1120. (Chinese Source)
- [7] 沈吉,向锦武,等.目标运动对步进频率毫米波雷达图像匹配识别的影响研究[J].电子学报,2003,31(3):345-348.
SHIN Ji, XIANG Jin wu, et al. Study of influence of target's motion on target identification for stepped frequency MMW radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(3): 345-348. (Chinese Source)

作者简介:



陈行勇 男,1978年10月出生于江西萍乡,现为国防科技大学电子科学与工程学院博士生,研究方向:自动目标识别与模糊工程,联系地址:湖南省长沙市国防科技大学电子科学与工程学院空间电子信息技术研究所, E-mail: NUDT_ATR_CHY@163.com.

魏玺章 男,1976年出生于河北吴桥,博士,副教授,1997年毕业于国防科技大学微波工程专业,获工学学士学位,2002年毕业于国防科技大学信息与通信工程专业获工学博士学位,研究领域是信息融合、雷达目标识别等,获军队科技进步一等奖一项、国家科技进步二等奖一项,发表学术论文十余篇,联系地址:湖南省长沙市国防科技大学电子科学与工程学院空间电子信息技术研究所, E-mail: liweiwei@sina.com.