

DOI: 10.7652/xjtuxb201702012

一种机载外辐射源雷达微弱目标检测方法

邓亚琦, 王俊, 武勇, 王珏, 罗振
(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 针对机载外辐射源雷达系统中直达波信号参数估计误差导致的杂波抑制性能下降、微弱目标检测性能恶化的问题,提出了一种机载外辐射源雷达体制下微弱目标检测方法。该方法在建立杂波和微弱运动目标信号模型的基础上,对重叠分段后的两通道信号进行匹配滤波,然后分别对两通道信号进行 Keystone 变换完成相对径向速度的距离徙动校正,最后构造通道间相位偏差补偿函数,并结合两通道相位中心偏置天线(DPCA)方法解决杂波剩余问题。仿真结果表明:考虑直达波参数估计误差的影响能够提高微弱目标检测能力;在载机偏航角为 2° 的情况下,该方法与忽略相位偏差的传统 DPCA 方法和理论值补偿相位偏差的 DPCA 方法相比,检测信噪比分别提高了 12 dB 和 7 dB 以上。

关键词: 外辐射源雷达;机载雷达;直达波;通道相位偏差

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)02-0072-07

A Weak-Target Detection Method for Airborne Passive Radar

DENG Yaqi, WANG Jun, WU Yong, WANG Jue, LUO Zhen
(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A weak-target detection method for airborne passive radar is proposed to solve the problems of clutter suppression ability loss and detection ability loss caused by parameter estimation errors of direct signals. The method builds models of clutter and weak moving target signals, and applies the match filtering to each segment after each channel signal is divided by the overlapping segment method. Then the Keystone transform is applied to both channels to correct the range cell migration due to relative radial velocity. Finally the problem of clutter residual is solved by combining a phase deviation compensation function with DPCA technology. Simulation results show that the ability of target detection is improved by considering the parameter estimation error of direct signal. When the yaw angle is 2° , comparisons with the methods using DPCA technology without considering the channel phase deviation and with compensation using theoretical value show that the detection SNR of the proposed method increases by more than 12 dB and 7 dB, respectively.

Keywords: passive radar; airborne radar; direct signal; channel phase deviation

外辐射源雷达利用非合作信号作为发射源,具有成本低、体积小、生存能力强等优点^[1-2],但其较低的辐射功率使微弱目标的检测需要更长的积累时间,导致目标的距离和多普勒跨越多个单元,目标能

量分散。此外,不同于传统外辐射源雷达,机载外辐射源雷达由于接收机平台的运动,杂波不再分布在零多普勒附近,采用传统的时域自适应滤波算法无法有效滤除杂波和检测目标^[3-9]。

目前,通常采用相位中心偏置天线(DPCA)方法和空时自适应处理(STAP)方法^[6-9]实现机载外辐射源雷达的目标检测。文献[6]应用两通道 DPCA 技术实现了基于调频广播(FM)信号的机载外辐射源雷达杂波抑制和运动目标检测;文献[7]对比了基于地面数字电视(DVB-T)信号的机载雷达分别应用 DPCA 算法和 STAP 算法的目标检测结果;文献[8]重点研究了基于 DVB-T 信号的近距离强杂波和直达波信号的旁瓣对 STAP 的影响,并给出改进的自适应滤波算法来消除强杂波;文献[9]进一步分析了自适应滤波后,应用降秩和降维的 STAP 算法滤除待检测单元的杂波。然而,上述方法主要考虑短时间积累情况下检测较强目标,而微弱目标的检测则需要大大增加相参积累时间。此时,接收机平台的运动会导致运动目标和静止杂波存在徙动^[3],目标能量分散,积累增益下降,并且杂波徙动和数据长度的增大使 STAP 算法中杂波协方差矩阵的求取不易实现。同时,在机载外辐射源雷达体制下,随着积累时间的增加,直达波的径向速度和径向加速度对 DPCA 通道间相位偏差的影响增大,系统误差的存在会导致直达波参数出现估计误差,利用先验知识得到的直达波参数来补偿 DPCA 通道相位偏差会使杂波出现剩余,而传统的 DPCA 误差分析方法^[10-12]没有考虑由直达波参数估计误差给杂波抑制性能带来的影响。

针对上述问题,本文建立了机载外辐射源雷达静止杂波和运动目标的信号模型,分析了直接利用 DPCA 技术不能较好滤除杂波的原因,提出了一种机载外辐射源雷达体制下微弱目标检测方法。该方法有效解决了杂波剩余和目标能量分散问题,并通过仿真验证了该方法的有效性。

1 信号模型与问题分析

考虑以地面商业辐射源作为外辐射源雷达的发射站,载机作为接收站,建立机载外辐射源雷达系统模型,其几何关系如图 1 所示。其中 T 为发射站的位置,安置有 3 副天线的载机作为接收机 R ,其中参考天线指向发射站接收直达波信号,另外 2 副天线(天线 1 和天线 2)垂直航向指向观测区域独立接收回波信号并形成两路数据通道(通道 1 和通道 2),

两天线沿载机航向的间距为 d 。接收机参考天线和天线 1 的初始位置分别为 R_0 和 R_1 , L_0 为发射站 T 距参考天线 R_0 的初始基线距离,观测区域第 i 个杂波散射点和第 l 个目标散射点的初始位置分别为 P_{ci} 和 P_{tl} , $R_{TP_{ci}0}$ 和 $R_{RP_{ci}0}$ 、 $R_{TP_{tl}0}$ 和 $R_{RP_{tl}0}$ 分别为初始时刻该杂波散射点和该目标散射点分别到发射站和天线 1 的距离。载机以速度 v_r 平行于地面匀速飞行,该目标以速度 v_l 作匀速运动, t 时刻接收机参考天线、接收天线 1 和该目标的位置分别为 R'_0 、 R'_1 和 P'_{tl} 。该目标运动方向与连线 $P_{tl}T$ 和 $P_{tl}R_1$ 的夹角分别为 γ_{1l} 和 γ_{3l} ,假设载机的实际飞行方向与连线 R_0T 、 R_1P_{ci} 和 $R_1P'_{tl}$ 的夹角分别为 α 、 β 和 γ_{2l} 。

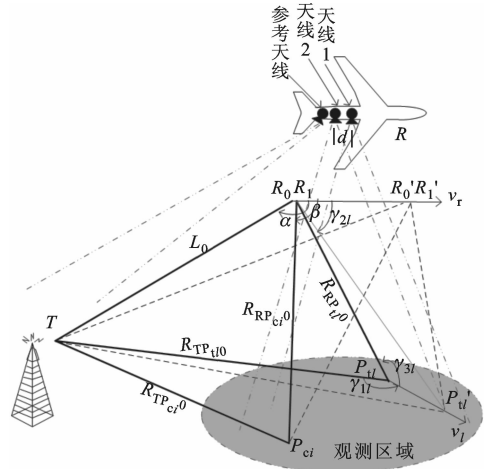


图 1 机载外辐射源雷达几何结构图

由图 1 的几何关系可得 t 时刻基线距离 $L(t)$ 在 $t=0$ 处的泰勒展开式

$$L(t) \approx R_d + v_d t + a_d t^2 / 2 \quad (1)$$

式中: $R_d = L_0$; $v_d = -v_r \cos \alpha$ 为直达波的径向速度; $a_d = (v_r \sin \alpha)^2 / L_0$ 为直达波的径向加速度。

天线 1、天线 2 接收到第 i 个杂波散射点的回波相对于直达波的径向距离分别为 $\Delta R_{ci1}(t)$ 和 $\Delta R_{ci2}(t)$

$$\Delta R_{ci1}(t) \approx R_{ci} + v_{ci} t + a_{ci} t^2 / 2 \quad (2)$$

$$\Delta R_{ci2}(t) \approx \Delta R_{ci1}(t - \Delta t) - \varphi(t - \Delta t) \quad (3)$$

式中: $\Delta t = d / v_r$; $\varphi(t) = [v_d \Delta t + a_d (\Delta t)^2 / 2] + a_d t \Delta t$; $R_{ci} = R_{TP_{ci}0} + R_{RP_{ci}0} - R_d$; $v_{ci} = -v_r \cos \beta - v_d$; $a_{ci} = -a_d + (v_r \sin \beta)^2 / R_{RP_{ci}0}$ 分别为天线 1 接收的第 i 个杂波散射点回波的相对初始距离、相对径向速度和相对径向加速度。

假设发射源基带信号为 $s(t)$, 第 $k(k=1, 2)$ 个通道的杂波信号为

$$y_{kc}(t) = \sum_i A_{ci} s\{t - [\Delta R_{ci1}(t - \tau_k) + \phi_k(t)] / c\} \cdot \exp\{-j2\pi f_c [\Delta R_{ci1}(t - \tau_k) + \phi_k(t)] / c\} \quad (4)$$

式中: A_{ci} 为第 i 个杂波回波信号的相对复幅度; f_c 为载波频率; c 为光速; $\tau_1 = 0$; $\phi_1(t) = 0$; $\tau_2 = \Delta t$; $\phi_2(t) = -\phi(t - \Delta t)$ 。

同理可知,第 $k(k=1,2)$ 个通道的目标回波信号为

$$y_{kt}(t) \approx \sum_l A_{klt} s\{t[\Delta R_{ul}(t - \tau_k) + \phi_k(t)]/c\} \cdot \exp\{-j2\pi f_c[\Delta R_{ul}(t - \tau_k) + \phi_k(t)]/c\} \quad (5)$$

式中: A_{1ul} 和 A_{2ul} 分别为两通道第 l 个目标散射点回波的相对复幅度; $\Delta R_{ul}(t)$ 为天线 1 接收的该目标散射点回波相对于直达波的径向距离,并满足 $\Delta R_{ul}(t) \approx R_{ul} + v_{ul}t + a_{ul}t^2/2$, 其中 $R_{ul} = R_{TP_{ul}^0} - R_d + R_{RP_{ul}^0}$, $v_{ul} = -v_r \cos \gamma_{2l} - v_l(\cos \gamma_{3l} + \cos \gamma_{1l}) - v_d$, $a_{ul} = (v_r^2 \sin^2 \gamma_{2l} + v_l^2 \sin^2 \gamma_{3l})/R_{RP_{ul}^0} + v_l^2 \sin^2 \gamma_{1l}/R_{TP_{ul}^0} - a_d$ 分别为天线 1 接收目标回波的相对初始距离、相对径向速度和相对径向加速度。

由式(4)和式(5)可得第 $k(k=1,2)$ 个通道的回波信号为

$$y_k(t) = y_{kc}(t) + y_{kt}(t) + n_k(t) \quad (6)$$

式中: $n_k(t)(k=1,2)$ 为两通道的噪声信号。

由于接收平台的运动,直达波信号存在径向速度和径向加速度,使得在经过 DPCA 算法的通道配准后,两通道杂波回波信号的相对径向距离之间存在距离偏差 $\varphi(t)$ 。当检测微弱目标增加相参积累时间时,距离偏差 $\varphi(t)$ 的影响不能忽略不计,而在实际环境中,载机受机动性、气流因素的影响往往存在偏航等运动误差,使得实际飞行方向与初始基线方向的夹角 α 与理论夹角 α' 之间存在估计误差,从而导致距离偏差 $\varphi(t)$ 的估计误差,表现为式(6)中两通道杂波分量 $y_{1c}(t)$ 和 $y_{2c}(t + \Delta t)$ 信号的包络和相位不一致。按照文献[6]的方法,在匹配滤波后对两通道信号进行 DPCA 处理,杂波不能被较大地对消,杂波剩余导致检测门限提高,杂波附近或杂波间的目标检测概率降低,不利于目标检测。同时,长时间相参积累会出现运动目标徙动问题,造成主瓣展宽,积累增益降低。杂波剩余和目标能量分散会严重影响目标检测性能。

2 检测方法

2.1 信号分段

假设发射源基带信号 $s(t)$ 的带宽为 B , 根据最大径向速度 $v_{\max}$ 和天线间距 d 对参考信号和两通道回波信号进行分段,使得段内无相对径向速度引起的距离徙动的同时保证通过段间的平移能满足双通道

DPCA 的条件,即分段后等效脉冲重复周期 T_1 满足

$$T_1 \leq c/(Bv_{\max}); \quad mT_1 = d/v_r \quad (7)$$

式中: m 为正整数。根据等效脉冲重复周期 T_1 , 按照重叠分段方式对回波信号和参考信号进行分段,段内为快时间 t_f , 段间为慢时间 t_m , 由于信号与噪声不相关,分段后的参考信号和第 $k(k=1,2)$ 个通道接收到单个散射点 $p(p$ 为目标或者杂波)的回波信号分别为

$$x(t_f, t_m) = s(t_f) \quad (8)$$

$$y_{kp}(t_f, t_m) = A_{kp} s\{t_f - [\Delta R_{p1}(t_m - \tau_k) + \phi_k(t_m)]/c\} \exp\{-j2\pi f_c[\Delta R_{p1}(t_m - \tau_k) + \phi_k(t_m)]/c\} \quad (9)$$

式中: 当 p 表示第 l 个目标时, $A_{kp} = A_{klt}$, $\Delta R_{p1}(t_m) = \Delta R_{ul}(t_m)$; 当 p 表示第 i 个杂波时, $A_{kp} = A_{ci}$, $\Delta R_{p1}(t_m) = \Delta R_{cil}(t_m)$ 。

2.2 相对径向速度的距离徙动校正

分别对两通道做匹配滤波实现距离维压缩,并对第 2 通道信号在慢时间维平移 m 个等效脉冲重复周期,以保证天线相位中心在积累时间内相对地面不动,达到两通道配准的目的。杂波和匀速运动目标的相对径向加速度对信号包络和多普勒频率的影响较小,对于目标有径向加速度的情况,由相对径向加速度引起的多普勒徙动的校正方法可以参考文献[13-16]。第 $k(k=1,2)$ 个通道单个散射点 p 的回波信号在快时间频域-慢时间域的表达式为

$$R_{kp}(f, t_m) = A'_{kp} |s(f)|^2 \exp[-j2\pi(f + f_c)v_p t_m/c] \exp(-j2\pi f R_p/c) \exp[j2\pi(f + f_c)\phi'_k(t_m)/c] \quad (10)$$

式中: $A'_{kp} = A_{kp} \exp(-j2\pi f_c R_p/c)$; f 为快时间频率; $\phi'_1(t_m) = 0$; $\phi'_2(t_m) = \phi(t_m)$; 当 p 表示第 l 个目标时, $R_p = R_{ul}$, $v_p = v_{ul}$; 当 p 表示第 i 个杂波时, $R_p = R_{ci}$, $v_p = v_{ci}$ 。

径向速度引起的距离徙动主要表现在式(10)中第 1 个指数项的快时间频率与慢时间的耦合,目标在积累时间内跨越多个距离单元,积累增益下降,不利于目标检测。

Keystone 变换本质为尺度变换,令 t_n 为虚拟慢时间,则有

$$t_m = [f_c/(f_c + f)]t_n \quad (11)$$

为了校正径向速度差引起的距离徙动,对式(10)应用 Keystone 变换,可得

$$R_{kp}(f, t_n) = A'_{kp} |s(f)|^2 \exp(-j2\pi f R_p/c) \cdot \exp(-j2\pi f_c v_p t_n/c) \exp[j\pi(f + f_c)\phi_{k1}] \cdot \exp(j2\pi f_c \phi_{k2} t_n) \quad (12)$$

式中: $\phi_{11}=0$; $\phi_{21}=[2v_d\Delta t+a_d(\Delta t)^2]/c$; $\phi_{12}=0$; $\phi_{22}=a_d\Delta t/c$ 。快时间频率与慢时间之间的耦合已消除,相对径向速度引起的距离徙动已得到校正。

2.3 通道间相位偏差校正及 DPCA 处理

式(12)中 ϕ_{k1} 与 ϕ_{k2} 的存在说明两通道信号变换到时域时,两通道杂波分量的包络和相位不一致,因此必须在应用 DPCA 方法前对两通道的相位偏差进行补偿以实现杂波的抑制。在快时间频域-慢时间域构造补偿函数

$$H(f, t_n) = \exp[-j\pi(f+f_c)\phi_{21}]\exp(-j2\pi f_c\phi_{22}t_n) \quad (13)$$

式(13)是为了补偿由于直达波径向速度和径向加速度产生的通道相位差的影响,得到第2通道补偿相位偏差后单个散射点 p 的回波信号表达式

$$R'_{2p}(f, t_n) = A'_{2p} |s(f)|^2 \exp(-j2\pi f R_p/c) \cdot \exp[-j2\pi f_c(v_p/c)t_n] \quad (14)$$

分析式(14)和式(12)可知,第2通道经慢时间平移、相位补偿后,两通道的杂波分量保持一致,对处理后的两通道信号进行 DPCA 相消,可得到相消后的结果

$$I(f, t_n) = \sum_l A_l |s(f)|^2 \exp[-j2\pi f(R_u/c)] \cdot \exp[-j2\pi f_c(v_u/c)t_n] \quad (15)$$

式中: $A_l = A'_{1l} - A'_{2l}$ 为 DPCA 处理后第 l 个目标回波信号的复幅度。此时,杂波被较好地抑制。

对式(15)在快时间频域上作逆傅里叶变换,将其变换到距离时域,然后在慢时间域上作傅里叶变换,将其变换到慢时间频域,信号在距离时域-慢时间频域的表达式为

$$I'(t_f, f_n) = \sum_l A_l T s'(t_f - R_u/c) \text{sinc}[T(f_n + v_u/\lambda)] \exp[-j\pi T(f_n + v_u/\lambda)] \quad (16)$$

式中: $s'(t_f) = \text{IFFT}(|s(f)|^2)$, $\text{IFFT}(\cdot)$ 为逆傅里叶变换; T 为积累时间; $\lambda = c/f_c$ 为信号波长。由式(16)可知,距离徙动得到校正,第 l 个目标的谱峰位于 $t_f = R_u/c$ 和 $f_n = -v_u/\lambda$ 的交点处。杂波被较好抑制的同时目标能量集中,目标检测能力提高。

2.4 算法实现

本文所提检测方法的基本思路为:首先,分别对参考信号和两通道回波信号进行分段处理,段内为快时间,段间为慢时间,并分别对两通道信号匹配滤波;然后,应用 Keystone 变换校正相对径向速度引起的距离徙动;最后,对第2通道信号乘以通道相位偏差补偿函数 $H(f, t_n)$,并结合两通道 DPCA 方法补偿由雷达平台运动引起的杂波谱展宽,实现杂波

抑制,并分别在快时间频域和慢时间域进行逆傅里叶变换和傅里叶变换得到在距离时域-慢时间频域的表达式 $I'(t_f, f_n)$ 。由于天线位置误差带来的初始基线距离 L_0 的估计误差 ΔL 满足 $\Delta L \ll L_0$,故忽略 ΔL 对直达波参数估计的影响,利用表达式 $I'(t_f, f_n)$ 和检测信噪比构造目标函数

$$r(t_f, f_n, \alpha) = 10 \lg [I'^2(t_0, f_0, \alpha) / \max_{\rho_t \leq |t_f - t_0| \leq 5\rho_t, \rho_f \leq |f_n - f_0| \leq 5\rho_f} I'^2(t_f, f_n, \alpha)] \quad (17)$$

式中: ρ_t, ρ_f 分别决定在距离时域、慢时间频域的搜索区间的位置。 $I'(t_f, f_n, \alpha)$ 满足

$$I'(t_f, f_n, \alpha) = | \text{FFT} \{ \text{IFFT} \{ \sum_p R_{1p}(f, t_n) - \sum_p R_{2p}(f, t_n) \exp \{ -j\pi(f+f_c)[(v_r \sin \alpha \Delta t)^2 - 2L_0 v_r \cos \alpha \Delta t] / L_0 c \} \exp \{ -j2\pi f_c(v_r^2 \sin^2 \alpha \Delta t / L_0 c) t_n \} \} } | \quad (18)$$

最后,利用目标函数对补偿函数 $H(f, t_n)$ 中的参数 α 进行搜索,目标函数最大值所对应的 $\hat{\alpha}$ 为真实参数的估计值,即 $\hat{\alpha} = \arg \max_{\alpha} \{ r(t_f, f_n, \alpha) \}$ 。综上所述,机载外辐射源雷达微弱目标检测的流程如图2所示。

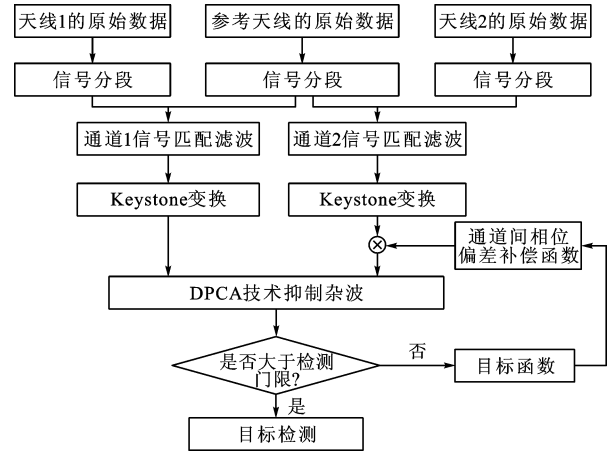


图2 检测方法流程图

3 仿真与分析

为了验证本文所提方法的有效性,本节给出以DVB-T信号作为发射源的仿真实验结果。系统的仿真参数如下:信号频率为674 MHz,带宽7.6 MHz,采样频率为10 MHz,波束宽度为 5° ,发射站高度为200 m,双基地初始基线距离为13 km,载机飞行速度为200 m/s,飞行高度为2 km,载机的理论飞行方向与初始基线方向夹角为 170° ,两天线沿载机航向的间距为1 m,仿真场景中设置有50个散射点,其中包含1个运动目标,49个杂波,杂噪比

$R_{CN} = -40$ dB,运动目标的相对径向速度为 184 m/s, 积累时间为 0.5 s, 分段数为 1 000。

理论上, 基于 DVB-T 的机载外辐射源雷达系统可以得到相对较窄的波束宽度, 此时, 与有源雷达系统的处理方法类似, 通过 DPCA 的实现机理可以较好地补偿由雷达平台运动引起的杂波谱展宽并实现杂波对消。图 3 给出了仿真条件下, 检测信噪比随偏航角度误差的变化曲线。由图 3 可见, 载机飞行角度偏差的存在导致真实飞行方向与初始基线方向的夹角 α 出现估计误差, 从而影响杂波相消性能。飞行角度偏差的大小如何影响杂波相消性能取决于机载外辐射源雷达双基构型, 即取决于理论飞行方向与初始基线方向的夹角的值, 对于固定的载机偏

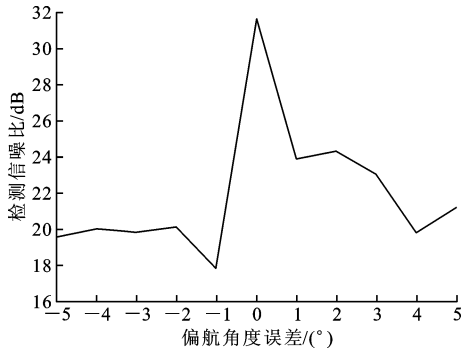


图 3 检测信噪比随偏航角度误差的变化曲线

航角, 双基配置不同, α 值的变化情况不同, 对杂波相消性能的影响也不同。因此本文利用代价函数直接对参数 α 进行搜索可以获得较好的相消性能。

以偏航角度误差为 2° 为例, 分别应用 DPCA 处理、KT+理论参数值补偿+DPCA 处理与本文方法进行目标检测仿真, 其结果如图 4、图 5 所示。图 4 给出了当信杂噪比 $R_{SCN} = -60$ dB 时, 在距离维上的检测结果, 其中图 4a 为直接对两通道数据做 DPCA 处理^[6]的目标检测结果, 可以看出当检测微弱目标增加相参积累时间时, 该方法无法解决由通道相位差引起的杂波剩余问题和较长积累时间下目标的徙动问题, 检测信噪比大大降低, 无法检测到目标峰值。图 4b 给出了两通道数据应用 Keystone 变换(KT)后, 用先验知识得到的 α 理论值补偿通道相位偏差并做两通道 DPCA 处理的目标检测结果。与图 4a 相比, 图 4b 的杂波剩余减少, 杂波平台较低, 目标能量集中, 检测信噪比提高了约 5 dB, 可以检测到目标峰值, 说明直达波径向速度和径向加速度引起的相位偏差影响 DPCA 的杂波对消性能, 与本文前面分析一致, 但参数 α 的估计误差导致用理论值补偿的杂波抑制结果较差, 仍存在杂波剩余, 影响目标检测。图 4c 为本文算法的处理结果, 利用搜索得到的 α 参数估计值来补偿通道间相位偏差, 杂波

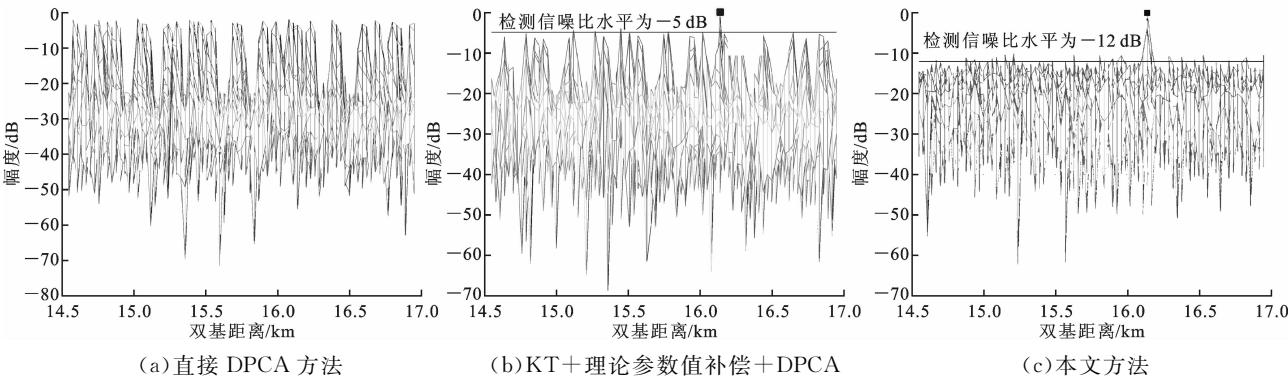


图 4 $R_{SCN} = -60$ dB 时在距离维的目标检测结果

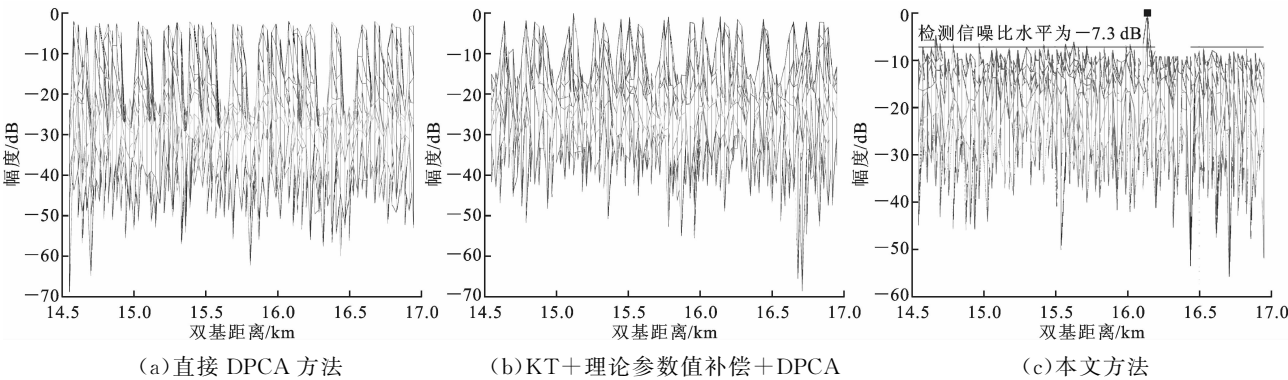


图 5 $R_{SCN} = -65$ dB 时在距离维的目标检测结果

被较大程度地抑制,Keystone变换使目标的距离徙动得到有效校正,检测信噪比约为12 dB,检测性能提高。图5给出了当 $R_{\text{SCN}} = -65$ dB时在距离维上的处理结果,其中图5a为直接两通道DPCA处理结果,图5b为KT+理论参数值补偿+DPCA的检测结果,图5c为本文算法的检测结果,通过对比可知,当 $R_{\text{SCN}} = -65$ dB时,图5a和图5b均无法有效检测目标,而本文方法的检测信噪比约为7.3 dB,其结果明显优于前两种方法处理结果,对微弱目标具有良好的检测能力,表明了本文算法的有效性。

4 结 论

本文详细分析了机载外辐射源雷达体制下,直达波径向速度和径向加速度对DPCA杂波抑制性能的影响。在长时间相参积累及直达波参数出现估计误差的情况下,提出一种微弱目标检测方法。本文方法在建立系统信号模型的基础上,根据检测信噪比构造目标函数,利用直达波的参数估计值构造通道间相位偏差补偿函数,结合DPCA处理有效实现了杂波相消。仿真结果表明:在机载外辐射源雷达体制下,考虑直达波参数估计误差的影响能够提高微弱目标的检测能力,说明了本文所提检测方法的有效性。

本文针对固定的机载无源双基地构型,提出了相应的微弱目标检测方法。对于不同双基构型的直达波参数估计误差如何影响系统的检测性能,以及后续的机载双基构型的选取将会是下一步的研究工作。

参考文献:

- [1] COLONE F, O'HAGAN D W, LOMBARDO P, et al. A multistage processing algorithm for disturbance removal and target detection in passive bistatic radar [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2): 698-722.
- [2] TAN D K P, SUN H, LU Y, et al. Passive radar using global system for mobile communication signal: theory, implementation and measurements [J]. IEE Proceedings: Radar Sonar and Navigation, 2005, 152(3): 116-123.
- [3] KULPA K, MALANOWSKI M, SAMCZYNSKI P, et al. The concept of airborne passive radar [C]//Proceedings of 2011 Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE Computer Society, 2011: 267-270.
- [4] BROWN J, WOODBRIDGE K, STOVE A, et al. Air target detection using airborne passive bistatic radar [J]. Electronics Letters, 2010, 46(20): 1396-1397.
- [5] GROMEK D, SAMCZYNSKI P, KUPLA K, et al. Analysis of range migration and Doppler history for an airborne passive bistatic SAR radar [C]//Proceedings International Radar Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE Computer Society, 2014: 1-6.
- [6] DAWIDOWICZ B, KULPA K S, MALANOWSKI M, et al. DPCA detection of moving targets in airborne passive radar [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(2): 1347-1357.
- [7] DAWIDOWICZ B, SAMCZYNSKI P, MALANOWSKI M, et al. Detection of moving targets with multichannel airborne passive radar [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2012, 27(11): 42-49.
- [8] TAN D K P, LESTURGIE M, SUN H, et al. Space-time interference analysis and suppression for airborne passive radar using transmissions of opportunity [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2014, 8(2): 142-152.
- [9] TAN D K P. Signal processing for airborne passive radar: interference suppression and space time adaptive processing techniques for transmissions of opportunity [J]. Journal of Clinical Investigation, 2012, 54(3): 576-582.
- [10] 吕孝雷, 苏军海, 邢孟道, 等. 三通道 SAR-GMTI 误差校正方法的研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(6): 1037-1042.
LÜ Xiaolei, SU Junhai, XING Mengdao, et al. Study on the error calibration method for tri-channel SAR-GMTI [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(6): 1037-1042.
- [11] 刘向阳, 廖桂生, 杨志伟, 等. 机载多通道雷达 DPCA 误差补偿及稳健的杂波抑制 [J]. 电子学报, 2009, 37(9): 1982-1988.
LIU Xiangyang, LIAO Guisheng, YANG Zhiwei, et al. DPCA error compensation and robust clutter suppression for multi-channel airborne radar [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 1982-1988.
- [12] 张英, 李景文. 基于 DPCA 的机载 SAR-MTI 系统误差分析及补偿方法研究 [J]. 电子学报, 2003, 31(S1): 2031-2034.
ZHANG Ying, LI Jingwen. System error analysis and calibration method for airborne SAR-MTI system based on DPCA technique [J]. Acta Electronica Sinica

- ca, 2003 31(S1): 2031-2034.
- [13] LÜ X, BI G, WAN C, et al. Lv's distribution: principle, implementation, properties, and performance [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(8): 3576-3591.
- [14] 苏军海, 李亚超, 邢孟道, 等. 采用 Radon 模糊变换的宽带雷达多目标检测方法 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(4): 85-89.
- SU Junhai, LI Yachao, XING Mengdao, et al. A wideband radar detection method for multi-target using radon ambiguity transform [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(4): 85-89.
- [15] 战立晓, 汤子跃, 朱振波. 高机动小 RCS 目标长时间相参积累检测新方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(3): 511-516.
- ZHAO Lixiao, TANG Ziyue, ZHU Zhenbo. Novel method of long term coherent integration detection for maneuvering small RCS targets [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(3): 511-516.
- [16] 郑纪彬, 任爱锋, 苏涛, 等. 多分量 Chirp 信号相位参数的精确估计算法 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(2): 69-74.
- ZHENG Jibin, REN Aifeng, SU Tao, et al. An accurate estimation algorithm for phase parameters of multi-chirp signals [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(2): 69-74.
- (编辑 刘杨)

(上接第 12 页)

- [17] CORAS F, JAKAB L, CABELLOS-APARICIO A. CoreSim: a simulator for evaluating locator/ID separation protocol mapping systems [EB/OL]. [2016-07-25]. <http://119.90.25.29/people.ac.upc.edu/fcoras/publications/2009-fcoras-trilogy-Coresim.pdf>.
- [18] ZHANG L, AFANASYEV A, BURKE J, et al. Named data networking [J]. ACM Sigcomm Computer Communication Review, 2014, 44(3): 66-73.
- [19] FARINACCI D, FULLER V. An architectural introduction to the locator/ID separation protocol (LISP) [EB/OL]. (2015-04-02) [2016-07-26]. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc6830/>.
- [20] GEORGE F. ns-3 tutorial [EB/OL]. [2016-07-28]. <https://www.nsnam.org/docs/tutorial/html/>.
- [21] AURA T. Support for multiple hash algorithms in cryptographically generated addresses (CGAs) [EB/OL]. (2015-10-24) [2016-07-26]. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc3972>.
- [22] HEER T. Host identity protocol certificates [EB/OL]. (2016-06-22) [2016-07-28]. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc7401/>.
- [23] CURBERA F, DUFTLER M, KHALAF R, et al. Unraveling the web services web: an introduction to SOAP, WSDL, and UDDI [J]. IEEE Internet Computing, 2002, 6(2): 86-93.
- [24] 史楠, 邱劲锋, 侯迪, 等. 一种敏捷服务组合方法模型的研究与设计 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(2): 1-6.
- SHI Yi, QIU Jinfeng, HOU Di, et al. Design of an agile service composition approach model [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(2): 1-6.
- (编辑 刘杨)

(上接第 64 页)

- [12] 赵珊, 王彪, 唐超颖. 基于链码表示的手臂静脉特征提取与匹配 [J]. 光学学报, 2016, 36(5): 1-12.
- ZHAO Shan, WANG Biao, TANG Chaoying. Arm vein feature extraction and matching based on chain code [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 1-12.
- [13] SHEN Wei, BAI Xiang, YANG Xingwei, et al. Skeleton pruning as trade-off between skeleton simplicity and reconstruction error [J]. Science China Information Sciences, 2013, 56(4): 1-14.
- [14] FATIMA J, SYED A M, AKRAM M U. Feature point validation for improved retina recognition [C]// Proceedings of the 2013 IEEE Workshop on Biometric Measurements and Systems for Security and Medical Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 13-16.
- [15] 刘文星, 王肇圻, 母国光. 纹线跟踪及其在细化指纹后处理中的应用 [J]. 光电子·激光, 2002, 13(2): 184-187.
- LIU Wenxing, WANG Zhaoqi, MU Guoguang. Ridge tracing and application in post-processing of thinned fingerprints [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2002, 13(2): 13-16.
- [16] OTSU N A. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- (编辑 武红江)