

基于混合积累的 SAR 微弱运动目标检测

李 刚¹, 许 稼^{1,2}, 彭应宁¹, 夏香根³, 严 军¹

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 空军雷达学院, 湖北武汉 430010;

3. Dept of ECE, University of Delaware, Newark, DE 19716, USA)

摘 要: 本文指出在合成孔径雷达(SAR)有限的检测时间内,运动目标的徙动轨迹可近似为一条直线.进而提出了一种基于相干-非相干混合积累的微弱运动目标检测新方法:把检测时间分成多个连续的相干处理间隔(CPI),在各CPI内部通过FFT实现同一距离单元内信号的相干积累,在各CPI间通过Hough变换实现跨越距离单元的非相干积累,从而获得大的积累增益.仿真实验证明,新方法可显著改善微弱运动目标的检测性能.

关键词: 合成孔径雷达; 运动目标检测; 相干积累; 非相干积累

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 03-0576-04

SAR Weak Moving Target Detection Based on Hybrid Integration

LI Gang¹, XU Jia^{1,2}, PENG Ying-Ning¹, XIA Xiang-Gen³, YAN Jun¹

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Radar Academy of Air Force, Wuhan, Hubei 430010, China; 3. Dept of ECE, University of Delaware, Newark, DE 19716, USA)

Abstract: In the limited synthetic aperture radar (SAR) detection time, it is shown that the track of the moving target may be approximated to a linear function versus azimuth time. Furthermore, an effective method of SAR weak moving target detection is proposed based on hybrid integration in this paper. The detection time duration is divided into multiple coherent processing intervals (CPIs). Coherent integration in same range cell may be done via fast Fourier transform (FFT) within each CPI and noncoherent integration through several range cells may be done via Hough transform among all CPIs, and thus higher integration gain can be obtained. Simulation results are also given to demonstrate that the detection performance of weak moving target may be dramatically improved.

Key words: SAR; moving target detection; coherent integration; noncoherent integration

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨率微波成像系统,已被广泛应用到侦察、测绘等方面,SAR与地面运动目标显示(GMTI)、空中运动目标显示(AMTI)相结合一直是该领域研究的热点问题.目前用SAR检测运动目标可分为短相干积累和长相干积累两大类.其中短相干积累方法有频域滤波^[1]、空时处理(DPCA^[2,3]、STAP^[2,3])等,此类方法在较短的时间内把运动目标回波视为单频信号并进行相干积累,其缺点是不能充分利用SAR的大量脉冲信息.长相干积累方法有时-频分析^[4]、图像域检测^[5]等,此类方法对较长时间内运动目标的线性调频(chirp)信号进行相干积累,其前提是距离向脉压后,目标的回波分布在一个或少量距离单元内部.然而在实际应用中,运动目标在检测时间内往往跨

越了多个距离单元,而且其运动是非合作的,无法预知其具体的距离徙动.目前,降分辨率方法是实现基于长相干处理单个运动目标检测的常用方法,但其难以实现密集多目标区域的目标检测.我们在文献[6]中提出一种SAR运动目标边跟踪边成像的新处理方法,可实现跨越多个距离单元的单目标的信号相干积累和聚焦成像,但其准确的参数估计和成像的基础是建立在高性能检测环节的基础之上的.

综上所述,如何充分利用SAR目标照射期间的大量脉冲信息、有效抑制虚警、实现微弱目标检测是SAR运动目标处理领域一个具有重要意义和挑战性的问题.据此,本文提出一种基于相干-非相干混合积累的微弱运动目标检测方法,实现了距离单元内的相干积累和跨越多个距离单元的非相干积累,从而获得较大的积累增益.在检测时间T内,运动目标的距离弯曲成分可忽略,

收稿日期:2005-11-22 修回日期:2006-05-22

基金项目:国家自然科学基金(No. 60502012);部委预研基金(No. 51407030203JW141);航天支撑基金(No. J04-2005047)

其徙动轨迹可近似为直线,因此目标点迹也呈直线分布.针对 SAR 已完成距离向脉压的数据,首先把检测时间分成多个连续的相干处理间隔(CPI),在每个 CPI 内通过 FFT 实现同一距离单元上信号的相干积累,并经过第一门限的判决输出点迹图.然后,在各 CPI 之间通过 Hough 变换搜索目标点迹同时完成跨越多个距离单元的非相干积累.本文采用非相干二元积累,将积累结果与第二门限判决实现最终的目标检测.仿真实验表明,基于混合积累的新方法可显著改善 SAR 微弱运动目标的检测性能.

2 检测时间内目标徙动轨迹的直线近似

SAR 与运动目标在斜距平面的几何模型如图 1 所示.设雷达平台沿方位向以速度 v 匀速飞行; t 为方位向慢时间;目标在检测时间段 $[-T/2, T/2]$ 内做匀速直线运动,其径向和横向速度分别为 v_r 和 v_x ; $t=0$ 时目标位于雷达正侧视方向,到雷达的距离为 r_0 .则目标与雷达的瞬时距离函数为

$$R(t; r_0) = \sqrt{(v - v_x)^2 t^2 + (r_0 - v_r t)^2} \quad (1)$$

在 $t=0$ 处对式做泰勒展开得到

$$R(t; r_0) = r_0 - v_r t + \frac{(v - v_x)^2 t^2}{2r_0} + L \quad (2)$$

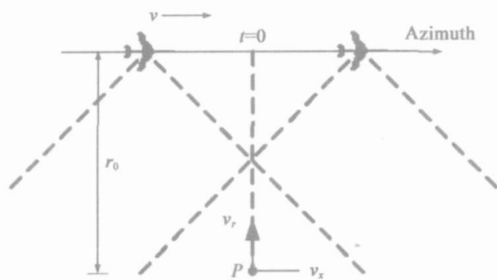


图 1 SAR 与运动目标几何模型

图 2 给出了式(2)各项的示意图: t 的常数项和线性项为距离走动(range walk) R_w , t 的高次项为距离弯曲(range curvature) R_c ,其中三次及更高次项往往可忽略,二次项是 R_c 的主要成分.至此,可得目标距离徙动为 $R = R_w + R_c$.当 $[-T/2, T/2]$ 内距离弯曲的最大程度 R_c 小于距离向分辨率 r 时,即

$$\frac{(v - v_x)^2 (T/2)^2}{r_0} < \frac{v^2 (T/2)^2}{r_0} \quad (3)$$

其中 $r = c/(2B)$, B 为发射信号带宽, c 为光速,实际目标横向速度 v_x 一般远小于载机速度 v ,这里忽略其影响.于是在满足式(3)的条件下,式(2)可近似为一条直线,即

$$R(t; r_0) \approx r_0 - v_r t \quad (4)$$

由式(3)可确定检测时间 T ,在此特别指出:(1) T 一般小于合成孔径时间 T_s .设 θ 为方位向天线波束开角,则 $T_s = r_0 / v$.容易计算, $[-T_s/2, T_s/2]$ 内最大距离弯曲程度为 $r_0^2/4$,一般要大于 r ,因此 $T < T_s$.(2) T 一般大于传统的 MID 采用的短相干积累时间 $T_c^{[1-3]}$.如图 2 所示,传统的短相干积累方法要求在积累时间 T_c 内 $R = R_w + R_c < r$,而本文方法只限制检测时间 T 内 $R_c < r$,因此 T 可远大于 T_c .(3) 当 T 满足式(3)时,距离弯曲项 R_c 相对距离分辨率可忽略,但相对载波波长不可忽略.因此,在检测时间 T 内,目标回波仍是 chirp 信号,与常用信号模型是一致的.

3 CPI 内相干积累

本节讨论 CPI 内的相干积累.类似于短相干积累方法^[1-3],设在每个 CPI 占用的时间 T_c 内 $R < r$.若感兴趣的目标速度范围是 $[-v_{max}, v_{max}]$,则 $T_c = 2r/v_{max}$;若脉冲重复频率为 f_{PRF} ,则每个 CPI 包含 $M = f_{PRF} \cdot T_c$ 个脉冲.在每个 CPI 内,目标信号是检测时间内 chirp 信号的一段,严格的说也是 chirp 信号.但由于 T_c 较小,CPI 内信号带宽小于频率分辨率 $1/M$,因此 CPI 内信号可近似为单频.若信号频率位于杂波区之外,可以通过基于脉冲对消的 GMTI 方法抑制杂波^[1];若信号频率位于杂波区之内,可以通过多通道空-时二维联合处理^[2,3]抑制杂波.这些方法的有效性都已得到充分验证.因此,本文不再赘述有关杂波抑制的问题,而是在杂波已经被有效部分抑制的前提下,讨论如何通过脉冲积累进一步提高检测性能,实现微弱目标检测.针对每个距离单元,设抑制杂波后信噪比(其中噪声包含剩余杂波干扰)为 SNR_0 ,在 CPI 内做 M 点 FFT 后信噪比为 SNR_1 .FFT 可实现信号的相干积累,其积累增益为^[8]

$$SNR_1 / SNR_0 = M \quad (5)$$

在 FFT 的输出结果上作包络检波和恒虚警(CFAR)检测,设定虚警概率为 P_{fa} ,可以得到第一门限 γ 、检测概率为 P_{d1} .上述分析和短相干积累方法^[1-3]相似,主要区别在于 γ 的选取.短相干积累方法中为了得到较低的虚警概率, γ 设置得较高,导致微弱目标被漏检;本文针对微弱目标,有意将 γ 适当降低,尽管这将导致每个 CPI 内部虚警概率较高,但后文 CPI 间的非相干积累将能够保证最终检测达到需要的虚警概率.

4 CPI 间非相干积累

本节我们讨论各 CPI 间的非相干积累.根据上节方

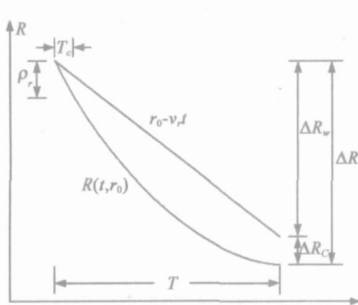


图 2 距离徙动示意图

法可得到检测时间内初步检测结果的二元(0/1)点迹图,横轴记录 CPI 序号,纵轴记录距离单元数.由于在检测时间 T 内,目标徙动轨迹呈直线状,所以目标点迹也沿一条直线分布;而 Hough 变换是平面中检测直线的有效手段^[7],因此我们在点迹图中应用 Hough 变换实现目标的二次检测.设第二门限 K ,则最终的检测准则为

$$HT(f) = \sum_{i=1}^N f(CPI_i, R_i) \begin{cases} > K, \text{有目标} \\ < K, \text{无目标} \end{cases} \quad (6)$$

其中 $N = T/T_c$ 是检测时间内的 CPI 数, $f(CPI, R)$ 是点迹图中的某一条直线, $HT(f)$ 表示对 $f(CPI, R)$ 做 Hough 变换.可见 Hough 变换实现了跨越多个距离单元的点迹二元积累,这是目标信号非相干积累的一种实现方法,获得积累增益约为^[8]

$$SNR_2/SNR_1 = \sqrt{N} \quad (7)$$

这样经过 CPI 内相干积累、CPI 间非相干积累,共获得积累增益为

$$SNR_2/SNR_0 = M \sqrt{N} \quad (8)$$

经过二次检测,最终的虚警概率和检测概率为

$$P_F = \sum_{i=K}^N C_N^i P_{d1}^i (1 - P_{d1})^{N-i} \quad (9)$$

$$P_D = \sum_{i=K}^N C_N^i P_{d1}^i (1 - P_{d1})^{N-i}$$

这种相干-非相干混合积累的优势是明显的,它比传统的短相干积累方法^[1-3]多出了 \sqrt{N} 倍的积累增益;而且实现了跨越多个距离单元的积累,这是传统的方法^[4,5]无法实现的.下面特别指出使用 Hough 变换实现非相干积累的必要性.(1) Hough 变换实现对非合作目标徙动轨迹的搜索和匹配.传统雷达也广泛采用滑窗积累等非相干积累技术,在多次扫描中对同一距离单元的回波能量求和或者对二元检测值求和.而 SAR 不能简单应用传统方法,这是因为目标运动跨越了多个距离单元,并且无法预知其徙动轨迹.而 Hough 变换可以通过平面内搜索直线自动匹配徙动轨迹并完成非相干积累.(2) Hough 变换对区分、匹配多个不同速度的目标是必要的.传统的运动目标检测(MID)为了实现同一距离单元上不同速度目标信号的相干积累,在频域采用了多普勒滤波器组(即 FFT).如果场景中存在多个不同速度的目标,它们都跨越了多个距离单元,则传统的多普勒滤波器组失效.此时各个目标的点迹分布在各自的直线状徙动轨迹上,Hough 变换可以通过搜索不同直线,自动地区分、匹配多目标.

5 仿真实验

为检验本文的新方法,以某机载 SAR 为原型设计了以下仿真实验.系统参数是:载机速度 $v = 110\text{m/s}$,脉

冲重复频率 $f_{PRF} = 1\text{kHz}$,信号带宽 $B = 250\text{MHz}$,载波波长 $\lambda = 0.03\text{m}$,方位向天线波束开角 $\theta = 5.5^\circ$,观测斜距 $r_0 = 15\text{km}$.根据以上参数可计算得到距离分辨率 $r = 0.6\text{m}$,考虑到距离脉压时加窗将略微增大分辨率,设 $r = 1\text{m}$,根据式设置检测时间 $T = 2.048\text{s}$,即检测时间包含 $N_a = 2048$ 个脉冲.设感兴趣的速度范围是 $[-v_{\max}, v_{\max}]$, $v_{\max} = 15\text{m/s}$,根据 $T_c = r/v_{\max}$ 和 $M = f_{PRF} \cdot T_c$ 可计

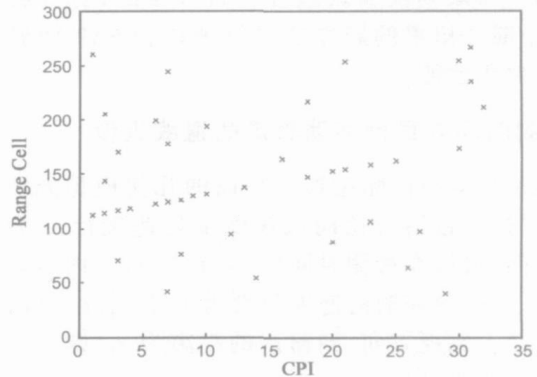


图3 经第一门限检测得到的点迹图

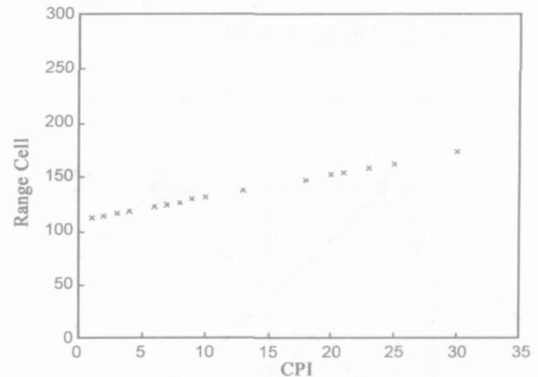
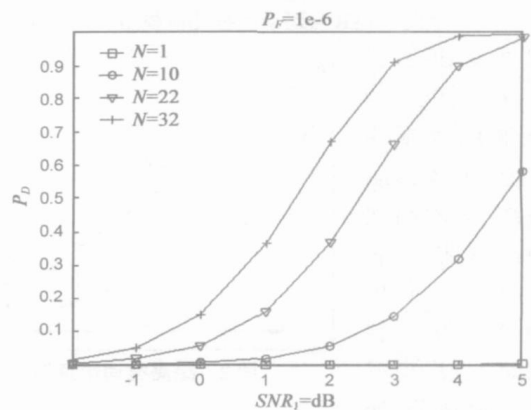


图4 经第二门限检测得到的目标点迹



算出每个 CPI 内包含脉冲数 $M = 64$,则 CPI 内相干积累增益为 $10\lg(M) = 18.06\text{dB}$,检测时间内共有 CPI 数目为 $N = T/T_c = 32$.设目标径向速度为 $v_r = 8\text{m/s}$,抑制杂波后信噪比为 $SNR_0 = -5\text{dB}$.根据 $P_{f1} = 10^{-3}$ 设定第一门限在各 CPI 内做 CFAR 检测,得到的点迹图如图 3 所示,

其中横轴为 CPI 序号,纵轴为距离单元数.可见目标运动轨迹基本沿直线分布,但在有些 CPI 内目标被漏检,导致整个目标的点迹有断续现象.此外还存在较多虚警点迹,这是由于我们为了检测到微弱运动目标而把第一门限设置得比较低造成的.在点迹图上用 Hough 变换实现二次检测,设定第二门限 $K=16$,检测结果如图 4 所示,可见虚警点迹都被去除,目标点迹清晰地被保留下来,进一步可以通过估计目标点迹所在直线的斜率来估计目标速度. Hough 变换提供的非相干积累增益约为 $10\lg(\sqrt{N}) - 7.53\text{dB}$,这是传统的短相干积累方法无法获得的.综合 CPI 内相干积累和 CPI 间非相干积累,总体的积累增益为 $18.06 + 7.53 = 25.59\text{dB}$.

下面考察本文方法检测更加微弱目标的性能.以非相干积累点数 N 为参数,设定总的虚警概率为 $P_F = 10^{-6}$ 、第二门限 $K = N/2$,画出非相干积累(即 Hough 变换)的检测性能曲线如图 5 所示,横轴是 CPI 内相干积累后的信噪比 SNR_1 ,纵轴是总的检测概率 P_D .可见当 $N=1$ 时,即不做非相干积累时,对 $\text{SNR}_1 = 5\text{dB}$ 的微弱目标检测概率相当低;而当 $N=32$, $\text{SNR}_1 = 1.43\text{dB}$ 时 $P_D = 50\%$.针对上文的具体仿真参数,已经计算出 CPI 内相干积累增益为 $10\lg(\text{SNR}_1/\text{SNR}_0) = 10\lg(M) = 18.06\text{dB}$,因此在抑制杂波后,在上述参数条件下,应用本文的方法检测 $\text{SNR}_0 = -16.63\text{dB}$ 的微弱运动目标可以获得 $P_F = 10^{-6}$ 、 $P_D = 50\%$ 的检测性能.

6 结论

在有限的检测时间内,本文指出运动目标的徙动轨迹可以近似为一条直线.并针对这一特点,提出了一种基于相干-非相干混合积累的 SAR 微弱运动目标检测方法:新方法在各 CPI 内部通过 FFT 实现同一距离单元上信号的相干积累,在各 CPI 之间通过 Hough 变换实现跨越多个距离单元的非相干积累,从而获得大的积累增益.仿真实验表明,本文的方法可显著抑制虚警,改善微弱运动目标检测性能.

参考文献:

[1] HUANG Yong, PENG Yingning, WANG Xiutan. Airborne adaptive MTI scheme with preventing the whitening of the tar-

get[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1999,14(7):19-21.

[2] 王永良,彭应宁.空时自适应信号处理[M].北京:清华大学出版社,2000.

WANG Yongliang, PENG Yingning. Space-Time Adaptive Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. (in Chinese)

[3] Klemm R. Space-Time Adaptive Processing-Principles and Applications[M]. London: IEE, 1998.

[4] Barbarossa S, Farina A. Detection and imaging of moving targets with synthetic aperture radar. Part 2: Joint time-frequency analysis and Wigner-Ville distribution [J]. IEE Proceedings Pt F, 1992, 139: 89-97.

[5] Kirscht M. Detection and imaging of arbitrarily moving targets with single-channel SAR[J]. IEE Proceedings Radar Sonar and Navigation, 2003, 150(1): 7-11.

[6] 许稼,李刚,彭应宁,等.合成孔径雷达运动目标的边跟踪边成像处理[C].合肥:中国合成孔径雷达会议,2005. 366-370.

XU Jia, LI Gang, PENG Yingning, et al. Simultaneous Tracking and Imaging of Moving Target for SAR [C]. Hefei: CSAR-2005. 366-370. (in Chinese)

[7] B D Carlson, E D Evans, S L Wilson. Serach radar detection and track with the hough transform, part : system concept [J]. IEEE Transaction on AES, 1994, 30(1): 102-108.

[8] 丁鹭飞,耿富录.雷达原理[M].西安:西安电子科技大学出版社,1995.

DING Lufei, GENG Fulu. Radar Pinciple. Xi'an: Xi'an Electronics Technology University Press, 1995. (in Chinese)

作者简介:

李 刚 男,1979 年生,现为清华大学电子工程系博士研究生,主要研究领域包括 SAR 成像、运动目标检测与成像、阵列信号处理等. E-mail: lig@hsp.ee.tsinghua.edu.cn

许 稼 男,1974 年生,清华大学电子工程系博士后,副教授.发表论文 40 余篇,被 SCI、EI 和 ISTP 收录近 30 篇.

彭应宁 男,1939 年生,清华大学电子工程系教授,博导.长期从事雷达信号处理领域的研究,发表论文近 200 篇,被 SCI、EI 和 ISTP 检索 120 余篇,出版专著 4 部,获十多项国家级和部委级科技进步奖.

夏香根 男,美国 Delaware 大学电子与计算机系教授,博导,在信号处理领域发表的 SCI 收录论文 90 余篇,任 IEEE Signal Processing Letters 等多个学会的会刊和杂志的编委.