

一种适用于 VFGPIR 序列图像的距离多视新方法

杨延光 周智敏 宋千 张汉华 金添

(国防科技大学电子科学与工程学院,长沙 410073)

摘要 车载前视地表穿透成像雷达(VFGPIR)探测系统获取的单帧图像中浅埋小目标的信噪比(SNR)通常较低,导致单帧图像的检测性能很差。利用VFGPIR系统可在不同观测位置对空间同一区域进行多次成像的特点,提出一种基于VFGPIR序列图像的非相干距离多视处理方法,通过距离子带分割和迭代操作实现在线多视处理,并推导了多视图像和单视图像检测概率、虚警概率与SNR之间的关系以及确定多视视数的公式。实测数据处理结果表明:非相干距离多视处理可明显增加目标SNR,很好地抑制相干斑噪声。该方法在明显改善图像质量、提高检测性能的同时,降低计算量。

关键词 车载前视地表穿透成像雷达 距离多视 距离子带分割 迭代操作 检测概率

中图法分类号: TN957, TN958 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)11-2247-08

A Novel Range Multilook Method for the Sequence Images of VFGPIR

YANG Yan-guang, ZHOU Zhi-min, SONG Qian, ZHANG Han-hua, JIN Tian

(UWB Laboratory, School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract Buried small targets usually have a very low signal-to-noise ratio(SNR) in a single frame image obtained by the vehicle-mounted forward-looking ground-penetrating imaging radar(VFGPIR) system. This will lead to poor detection performance of the single image. One special property of a forward-looking detection system is that the same spatial location is usually observed for multiple times, each at different range distances, as the vehicle moves ahead. Thus a non-coherent range multi-look accumulation method is presented by exploiting the sequence image obtained by VFGPIR in this paper. The range multi-look processing can be achieved on line by using the distance sub-band partition and iterative operation techniques. The relationship of detection probability, false alarm probability and SNR between the multi-look image and the single image is derived, and the formulation to determine the accumulative frame number is given. Experimental results of the real data show that the SNR of targets is obviously improved and the speckle is also well suppressed after the multi-look processing. Moreover, the proposed approach can obviously improve the quality of image and the detection performance while having a relatively small computational load.

Keywords Vehicle-mounted forward-looking ground-penetrating imaging radar, range multi-look processing, distance sub-band partition, iterative operation, detection probability

1 引言

地雷危机已成为全球性问题,据专家估计,在世界各地各国遗留的地雷共约 1.1 亿颗,导致每年有超过

2 万平民死亡或致残^[1]。车载前视地表穿透雷达能够实现快速、准确的单个地雷检测及雷场定位,且具有安全和高效率的特点,成为目前探雷装备的发展趋势^[2-7]。典型的车载前视 GPR 系统如美国斯坦福研究所(SRI)的车载 FLGPR^[2],美国规划系统有限公

收稿日期:2008-04-28;改回日期:2008-10-16

第一作者简介:杨延光(1980~),男。国防科技大学信息与通信工程专业博士研究生,研究方向为阵列信号处理、超宽带 SAR 成像与目标检测。目前已发表学术论文 10 余篇。E-mail:Yanguang_Yang@gmail.com

司 (PSI) 的车载 FLGPSAR^[6] 以及国防科技大学的车载前视地表穿透成像雷达 (VFGPIR) 探测系统。

与下视系统相比,前视系统没有镜面反射,可实现对浅埋地雷的准确探测,但地雷的雷达截面 (RCS) 比下视小,使得单帧图像中目标的信噪比 (SNR) 较低^[3,6]。此外,土壤对信号的进一步衰减以及强地杂波和相干斑噪声的存在,使得低信杂比 SCR (信杂化) 环境中浅埋小目标的检测成为一个世界性难题。通过目标增强和相干斑噪声抑制提高图像质量对提高检测性能至关重要。多视是抑制相干斑的一种有效途径,传统方位多视处理常用于高波段 SAR 图像的相干斑抑制,但其抑制相干斑是以降低方位分辨率为代价的^[8-9]。因 VFGPIR 为杂波受限系统,提高信杂比 (SCR) 成为图像预处理的关键。文献[10]中利用天线位于不同高度时的多站配置来获得各个单视图像,并利用这些单视图像进行多视处理抑制相干斑;针对车载前视系统可在前进过程中对同一区域进行多次观测的特点,文献[11]提出了利用连续多帧扫描结果进行相干距离多视和非相干距离多视的处理方法,并指出了两种方法的适用情况。文献[2]提出一种精确配准方法来实现相干多视处理,但精确配准和最优权值选取的实现都比较复杂。尽管上述多视方法并不降低方位分辨率,但都是事后处理方法。当要求进行实时多视处理时,对图像序列的自动配准程度要求很高,文献[12]采用差分全球定位系统 (DGPS) 获取车辆位置的估计数据以确保图像序列的配准。由于测量仪器的精度、快时间采样率的精度以及土壤对埋地目标的色散等诸多因素将使得序列图像很难达到像素级配准,不利于相干多视处理,因此本文采用非相干多视处理,这也有利于基于能量的恒虚警率 (CFAR) 检测器进行预筛选。

针对车载前视探测系统对实时性的要求,提出一种快速距离多视处理方法:采用距离子带分割方法将每帧整幅图像划分为一组子图像,以便实现并行处理;基于前一帧的多视结果,通过迭代操作快速得到当前帧的多视结果。同时,借鉴先跟踪后检测 (TBD) 算法在解决低信噪比条件下红外图像中弱小目标检测的思路,推导了多视图像与单帧图像之间检测概率、虚警概率与 SNR 的相互关系,并给出了最小积累视数与单视图像 SNR 和噪声特性以及系统所要求的探测指标间的关系式。实测数据处理结果表明,非相干距离多视处理通过对多帧序列图

像中目标能量的积累,可明显增强目标的 SNR,很好地抑制相干斑噪声,提高系统的探测性能。

2 基于距离子带分割和迭代操作的非相干距离多视处理

地雷探测通常要求检测概率为 100%,即确保目标无漏检,然而在某些单帧图像中目标强度可能低于检测门限,即使采用很高的虚警概率亦难确保目标都能够被检出,且为此而产生的过高虚警将增加后续的计算量。因此,在检测前通过多帧图像进行目标能量的积累来增加 SNR 是提高检测性能的关键,这一思想广泛应用于红外图像中弱小动目标的检测^[13]。车载前视探测系统具有在行进过程中对同一区域进行多次观测的特点,且目标的轨迹 (车辆行进的轨迹) 是已知的,故可以很好地将目标的能量沿其轨迹进行累积,借鉴 TBD 算法的思想,利用非相干距离多视处理实现目标能量的积累,增强图像 SNR 的同时抑制相干斑噪声。不同于目前国外系统采用的直接对图像序列进行加权叠加的多视方法,这里提出一种基于距离子带分割和迭代操作的非相干距离多视方法,根据成像区域和车辆每次扫描的步进距离,将每帧图像沿距离向划分为多个距离子带,最大程度地利用各帧的信息进行距离多视,可使得车前探测区域内的视数由近到远逐渐减少,最远处的子图像为单视图像,这样可最大程度地改善各个距离子图像的质量,提高系统对大面积区域的探测能力。通过视数归一化对各个距离多视子图像进行能量均衡,得到较好的视觉效果,且便于利用 CFAR 检测器对图像进行预筛选。

2.1 距离多视处理的实现步骤

VFGPIR 系统在行进探测工作模式下每前进 Δ 米扫描一次,得到相应探测区域内的一幅图像,根据成像区域距离向长度 R ,可将成像区域按距离向划分为 $S = R/\Delta$ 个距离带,每个距离带对应一幅子图像,以便采用多通道并行处理。为便于后续处理,相邻子图像需有一定的重叠区域。以划分 6 个距离带为例,图 1 给出了基于距离子带分割和迭代操作的快速距离多视处理方法的流程图。

利用 s 表示子图像索引号,其编号由大到小分别对应于成像区域近端到远端。而地面上的同一区域,从进入探测区域到出探测区域,雷达可对其连续观测 L 次,利用 l 表示连续 L 帧图像的索引号。为

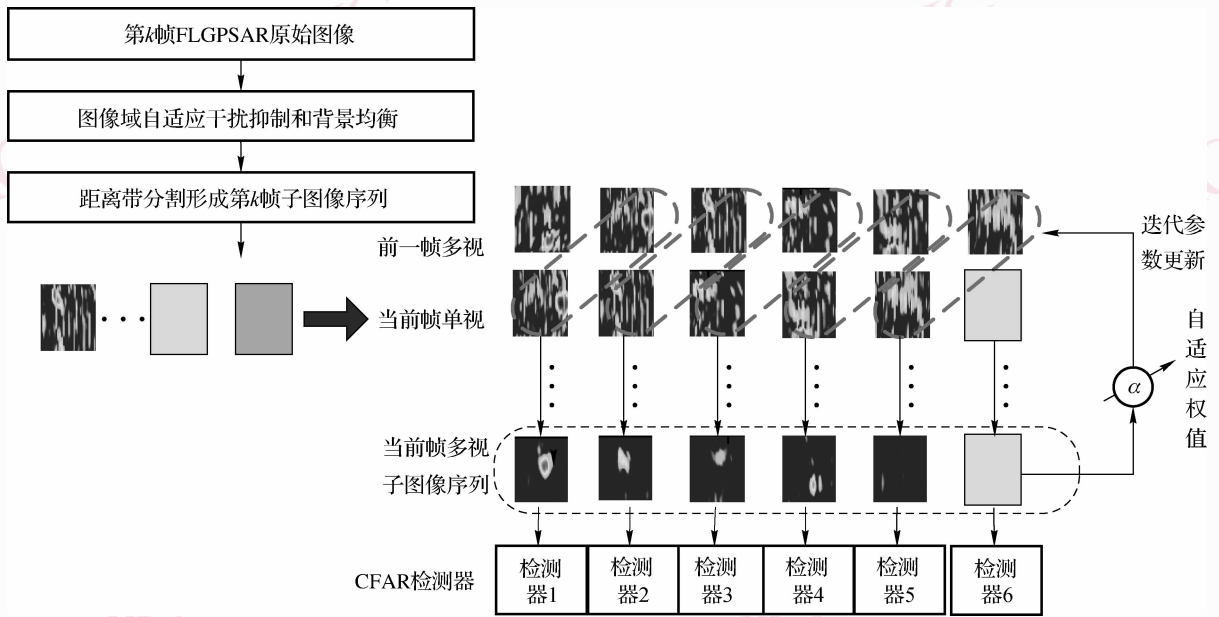


图 1 基于距离子带分割和迭代的自适应加权距离多视处理流程图

Fig. 1 Flow chart of adaptive weighting range multi-look processing based on distance-band partition and iterative operation techniques

尽可能地提高图像质量,通常取 $L = S$ 。距离多视处理的具体实现步骤如下:

(1) 定义多视加权系数 $\alpha (0 < \alpha < 1)$ 以及用于迭代操作的临时图像矩阵

$$I_{imp} = [I_{Pre}^1 \quad I_{Pre}^2 \quad \dots \quad I_{Pre}^{s-1}]^T \quad (1)$$

其中, $I_{Pre}^s, s = 1, 2, \dots, S - 1$ 表示经过自信号干扰抑制和背景均衡后的子图像,利用零矩阵初始化 I_{imp} ;

(2) 对于第 1 帧扫描图像,将其乘以 α ,然后将其前 $S - 1$ 个加权子图像存储到 I_{imp} 中相应位置,以便利用 I_{imp} 进行迭代更新及多视处理;

(3) 对于第 2 帧扫描图像,利用下式获取其相应的多视图像

$$I_{Pre}^M = [I_{Pre}^1 \quad I_{Pre}^s + I_{imp}]^T, \quad s = 2, 3, \dots, S \quad (2)$$

对于空间同一位置上的目标,由于当前帧图像总是在最近的观测距离获取,其 SNR 应高于以前帧的,在进行加权时赋予最大权值 1。然后利用当前多视图像中的前 $S - 1$ 个子图像更新 I_{imp}

$$I_{imp} = \alpha \cdot I_{Pre}^M [I_M^1 \quad I_M^2 \quad \dots \quad I_M^{s-1}]^T \quad (3)$$

(4) 对每帧扫描图像,重复利用步骤 3 即可实现当前帧图像的距离多视处理。

从第 $k (\geq L)$ 次扫描起,不同的距离子图像将具有不同的视数,为简化表示,仅给出某个多视子图像的表示式

$$I_M^s = I_k^s + \alpha I_{k-1}^{s-1} + \dots + \alpha^{s-2} I_{k-s+2}^{s-S+2} + \alpha^{s-1} I_{k-s+1}^{s-S+1} \quad (4)$$

式(4)可写成矩阵的形式

$$I_M^s = w_s I \quad (5)$$

其中, $w_s = [1 \quad \alpha \quad \dots \quad \alpha^{s-1}]$ 为加权系数向量, $I = [I_k^s \quad I_{k-1}^{s-1} \quad \dots \quad I_{k-s+1}^{s-S+1}]^T$ 为来自不同帧中的序列子图像构成的矩阵。经过背景均衡后,可认为在不同观测位置得到的同一区域的子图像幅度近似相同,因此式(5)中的加权系数向量可以写成求和的形式,并利用等比数列求和公式将其简化为

$$w_s = 1 + \alpha + \dots + \alpha^{s-1} = (1 - \alpha^s) / (1 - \alpha) \quad (6)$$

$0 < \alpha < 1, s = 1, 2, \dots, S$

当 $\alpha = 1$, 权系数为 $w_s = s, s = 1, 2, \dots, S$,即为文献 [11] 中的多视方法。

因不同的距离带子图像具有不同的多视视数,在利用 CFAR 检测进行图像的预筛选时,需进行视数归一化。由式(5)和式(6)可得视数归一化后的多视子图像为

$$\bar{I}_M^s = I_M^s / w_s, \quad s = 1, 2, \dots, S \quad (7)$$

上述距离多视方法在计算当前帧扫描的多视图

像时,不需计算所有的图像,所需存储空间小,且采用迭代的方法仅需考虑新增图像,子带分割使得并行处理方法得以应用,因此适合实时处理。

2.2 探测区域图像的形成及特点

由于 VFGPIR 探测系统可对车前一定区域进行 2 维成像,在某一距离上,存在最佳的单视图像^[5,7],利用其可拼成整个探测区域的单视图像。同样,也可利用每次得到的距离多视子图像构建整个探测区域的多视图像。仍以每帧图像划分为 6 个距离子图像为例进行分析,以地面为坐标系构建一个显示矩阵(用于形成前进过程中探测区域对应的图像),将每次扫描得到的多视图像中距离车辆最近的子图像存放在显示矩阵中。由于分割的距离子图像相互之间存在一定的重叠,在拼接时需去除重叠的部分。图 2 给出了探测区域对应多视图像的形成过程,显示矩阵中这些子图像代表由近及远的距离带。对于前 5 帧扫描,显示矩阵中形成的前 5 个距离带对应的子图像分别为 1,2,3,4 和 5 视,从第 6 帧扫描起,距离车辆最近的距离带对应的子图像均为 6 视。因此,当车辆持续行进探测时,除了起始和最后若干个距离带,可得到整个探测区域内视数相同的多视图像,所能积累的最大视数取决于每帧图像分割的距离带数目及车辆每次扫描步进的距离。

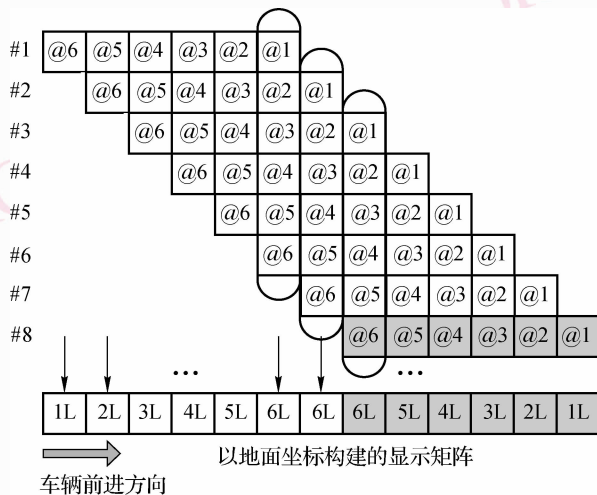


图 2 探测区域对应距离多视图像的构成示意图

Fig. 2 Forming sketch map of the multi-look image corresponding to the detection region

图 2 中第 8 帧扫描图像为当前帧图像时,它对应车子在前一位置扫描的成像结果,利用连续多帧图像进行距离多视处理后所形成的多视图像中,由

近及远的 6 个距离带对应的子图像分别为 6,5,4,3,2 和 1 视。此外,近端成像质量优于远端,结合多视处理,可进一步提高图像的质量,增加系统的探测距离,满足大面积探测的要求,且又符合由远到近成像质量逐渐提高的特点,满足地雷探测对安全性的需求。

3 检测概率与虚警概率的理论分析

采用多帧图像累加使像素值的方差减小而均值不变,可提高目标的 SNR,增强目标与背景的可分性^[13]。检测概率 P_d 、虚警概率 P_f 和 SNR 三者之间的精确关系取决于噪声的特性,文献[14]给出了高斯分布下单帧图像进行 CFAR 检测时门限的确定方法。在假定噪声为标准正态分布时,文献[15]采用二元假设检验给出单帧图像的检测概率和虚警概率,并基于 TBD 方法给出了多帧积累后的检测概率和虚警概率。在文献[15]的基础上,文献[16]对跟踪前检测(DBT)和 TBD 两种方法的性能进行比较,并指出 P_d 是积累帧数 M 和 SNR 的函数,在相同虚警概率下, P_d 随着积累视数 M 的增加而提高。文献[17]推导了背景噪声为零均值高斯分布时单帧和多帧积累图像的检测概率、虚警概率、SNR 和积累视数间的关系。然而经过预处理后的 GPSAR 图像中地杂波通常为非零均值高斯分布,且对同一区域多次观测所得图像中的背景杂波为独立同分布的。因此,在文献[17]的基础上,将背景杂波的假设条件放宽到高斯分布,推导了多视图像检测概率、虚警概率与单帧图像检测概率、虚警概率及 SNR 的关系,并给出了确定最小积累视数的公式及其影响因素。

3.1 单帧图像的检测概率与虚警概率

对预处理后的单帧图像进行二元假设检验^[17]

$$\begin{cases} H_1: X^{Sf} = s + n & \text{目标存在} \\ H_0: X^{Sf} = n & \text{目标不存在} \end{cases} \quad (8)$$

其中, s 和 n 分别为目标和噪声在图像坐标 (i,j) 处的灰度估计值, X^{Sf} 为 (i,j) 处像素的测量值,上标 Sf 表示对应单帧图像; $E(s) = A$, $E(n) = \mu$, $D(n) = \sigma^2$,这里 n 为高斯分布,因此测量值 X^{Sf} 也服从高斯分布。单帧图像的检测概率 P_d^{Sf} 和虚警概率 P_f^{Sf} 分别为

$$P_d^{Sf} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_T^\infty \exp\left[-\frac{(X^{Sf} - A - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dX^{Sf}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{T - A - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right) \\
 &= \Phi\left(\frac{\mu + (\mu + \sigma) \operatorname{SNR} - T}{\sigma}\right) \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_i^{\text{sf}} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_T^\infty \exp\left[-\frac{(X^{\text{sf}} - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dX^{\text{sf}} \\
 &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{T - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{\mu - T}{\sigma}\right) \quad (10)
 \end{aligned}$$

其中, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$, $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2) dt$, $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$, T 为 CFAR 检测的门限, $\operatorname{SNR} = A/(\mu + \sigma)$, $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt$ 定义为标准高斯分布函数。文献[17]中进一步给出了匹配检测概率、虚警概率、SNR 以及门限 T 之间的相互关系。

3.2 多视图像的检测概率与虚警概率

基于高精度的测量传感器, 车辆行进探测过程中可得到配准的连续图像序列, 假设各帧图像是独立的, 且经过干扰抑制和背景均衡后, 目标能量在各帧间是慢变化的, 则通过累加 M 帧单视图像中的测量值 X^{sf} 后, 由式(8)可知多视图像中的二元假设检验问题变为

$$\begin{cases} H_1: X^{\text{Mf}} = \sum_{m=1}^M [s(m) + n(m)] & \text{目标存在} \\ H_0: X^{\text{Mf}} = \sum_{m=1}^M n(m) & \text{目标不存在} \end{cases} \quad (11)$$

其中, M 为积累的帧数,

$$\begin{cases} E\left(\sum_{m=1}^M s(m)\right) = \sum_{m=1}^M E(s(m)) = MA \\ E\left(\sum_{m=1}^M n(m)\right) = \sum_{m=1}^M E(n(m)) = M\mu \\ D\left(\sum_{m=1}^M n(m)\right) = M\sigma^2 \end{cases} \quad (12)$$

则多视积累后的信噪比为

$$\begin{aligned}
 \operatorname{SNR}^{\text{Mf}} &= E\left(\sum_{m=1}^M s(m)\right) / \left(E\left(\sum_{m=1}^M n(m)\right) + \sqrt{D\left(\sum_{m=1}^M n(m)\right)}\right) \\
 &= \frac{\sqrt{M}(\mu + \sigma) \operatorname{SNR}}{\sqrt{M}\mu + \sigma} \quad (13)
 \end{aligned}$$

式(13)表明, 通过 M 帧积累后, 多视图像中目标的 $\operatorname{SNR}^{\text{Mf}}$ 的改善程度与单视图像中的 SNR 及噪声特性有关。由式(11)并结合式(9)和式(10)可得多视图像对应的检测概率和虚警概率分别为

$$\begin{aligned}
 P_d^{\text{Mf}} &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{T - MA - M\mu}{\sqrt{2M}\sigma}\right) \\
 &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left\{ \left[\sqrt{2}\sigma \operatorname{erfc}^{-1}(2P_d^{\text{sf}}) - (M - 1)[(\mu + \sigma) \operatorname{SNR} + \mu] \right] / \sqrt{2M}\sigma \right\} \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_i^{\text{Mf}} &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{T - M\mu}{\sqrt{2M}\sigma}\right) \\
 &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{2}\sigma \operatorname{erfc}^{-1}(2P_i^{\text{sf}}) - (M - 1)\mu}{\sqrt{2M}\sigma}\right) \quad (15)
 \end{aligned}$$

式(14)给出了高斯噪声条件下多视图像的检测概率 P_d^{Mf} 与单帧图像检测概率 P_d^{sf} 和 SNR 以及多视视数 M 间的关系; 式(15)相应地给出了 P_i^{Mf} 与 P_i^{sf} 和 M 间的关系, 而 P_i^{Mf} 与 SNR 的隐含关系可由单视图像中 P_i^{sf} 与 SNR 和 P_d^{sf} 间的关系来表征。式(14)和式(15)表明, 多视图像检测概率和虚警概率的改善程度均与单帧图像中的背景噪声特性有关。当已知系统检测概率 P_d^* 和虚警概率 P_i^* 的要求时, 需要积累的最小帧数 M 可由下式给出

$$\begin{aligned}
 M &= 2\sigma^2 \left[\frac{\operatorname{erfc}^{-1}(2P_i^{\text{Mf}}) - \operatorname{erfc}^{-1}(2P_d^{\text{Mf}})}{\operatorname{SNR}(\mu + \sigma)} \right]^2 \\
 &= 2\sigma^2 \left[\frac{\operatorname{erfc}^{-1}(2P_i^*) - \operatorname{erfc}^{-1}(2P_d^*)}{\operatorname{SNR}(\mu + \sigma)} \right]^2 \quad (16)
 \end{aligned}$$

式(16)给出了在进行多视处理时, 为达到系统所要求的探测指标所需积累帧数与单帧图像中目标的 SNR 及噪声特性间的关系。

4 实验结果分析

实测数据由国防科技大学研制的国内首个 VFGPIR 探测系统获取, 将从以下 3 个方面分析所提方法的正确性及其在提高 SNR 、改善图像质量方面的有效性。

(1) 基于距离子带分割和迭代操作的非相干距离多视方法的正确性

图 3 给出了某批次实测数据中的某帧单视图图像、相应的距离多视图图像及其视数归一化结果。多视图图像由连续 15 帧单视图图像经过非相干自适应加权距离多视处理获得,距离车辆最近的 4 个距离带为 15 视多视子图像,其他距离带的视数由近到远逐

渐减少,自适应加权系数为 0.95。图 3 中的 3 幅图像均按各自的最大值进行了归一化,其中位于成像区域近端的 4 个目标为金属 M6A1 防坦克地雷,中间的 4 个目标为某型塑料防坦克地雷,目标均浅埋于干黏土中。

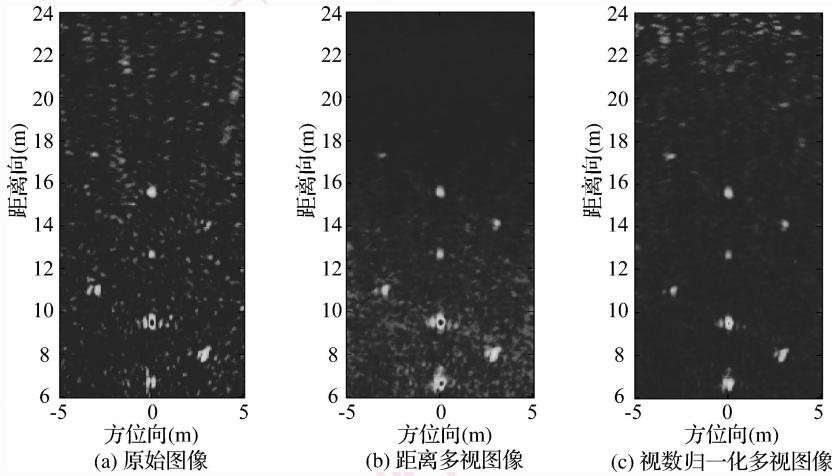


图 3 实测数据的某单视图图像及其相应的距离多视处理结果

Fig. 3 Single frame image and its corresponding range multi-look processing results of real data

由图 3 可以看出,单视图图像中相干斑噪声和杂波较强,而图像中背景杂波明显减少,目标能量得到增强,SNR 增大,图像质量明显提高。视数归一化后的图像更符合视觉上的渐变效果,即由近到远 SNR 逐渐降低,满足大面积探测的要求。此外,土壤色散基本上不影响非相干距离多视处理,仅影响目标距离向定位精度,这也证明了本文方法在实际应用中的可行性。

(2) 多视处理性能改善的定量分析

为定量评估多视处理在提高图像质量方面的有效性,需采用一些指标来进行衡量。由于实测图像中背景噪声不一定严格服从高斯分布,对于一帧图像,将图像中目标的 SNR 定义为

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{1/N_t \sum I_t | t \in \{\text{目标像素}\}}{1/N_n \sum I_n | n \notin \{\text{目标像素}\}} \quad (17)$$

式中 I 为像素强度值, N_t 为目标像素点数目, N_n 为背景噪声像素点数。即 SNR 定义为一帧图像中所有目标像素平均能量与所有噪声像素平均能量之比的对数值。图像中相干斑的抑制效果通常利用等效视数 (ENL) 和辐射分辨率来度量, ENL 和辐射分辨率 γ_r 定义为^[9-10]

$$\text{ENL} = \frac{[E(I)]^2}{\text{VAR}(I)} \quad (18)$$

$$\gamma_r = 10 \lg \left[1 + \frac{1 + \text{SNR}^{-1}}{\sqrt{\text{ENL}}} \right] \quad (19)$$

式(18)中 $E(\cdot)$ 和 $\text{VAR}(\cdot)$ 分别为均值和方差算子。

为便于进行比较,根据系统指标要求,选取具有代表性的 10 视多视子图像构建全场景多视图图像。图 4 给出了目标布设的场景图。

图 5 中的图像均按各自的最大值进行了归一化,可见多视图图像的质量明显提高,针对式(17)、式(18)和式(19)定义的各项指标,表 1 给出了图 5 中单视图图像与多视图图像的定量分析结果。

由表 1 可以看出,多视处理后目标 SNR 明显提高,相干斑噪声相比单视图图像也明显减小。

(3) 多视处理前后检测性能比较

为进一步分析多视处理对检测性能的改善程度,图 6 给出了接收机工作特性 (ROC) 曲线进行检测性能的比较。

由图 6 可以看出,在相同虚警概率下,多视图图像的检测性能明显高于单视图图像,验证了式(14)的正确性,所得结论与图 3、图 5 和表 1 亦相符。理论分析和实验结果的一致性进一步验证了本文方法在改善图像质量、提高检测性能方面的有效性。

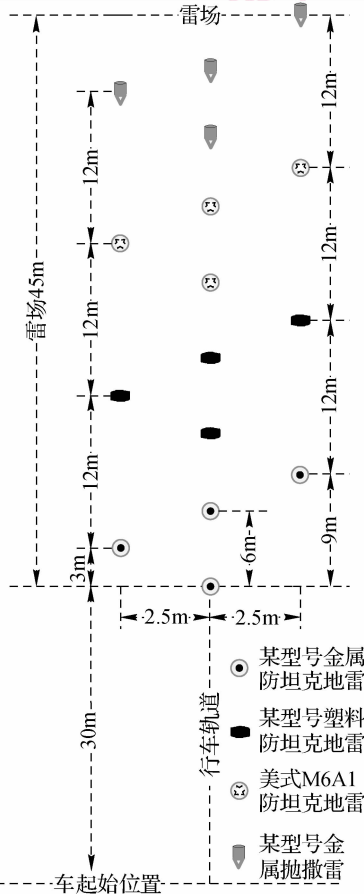


图 4 全场景探测区域对应的目标布设示意图
Fig. 4 Sketch map of targets lay out in the whole region

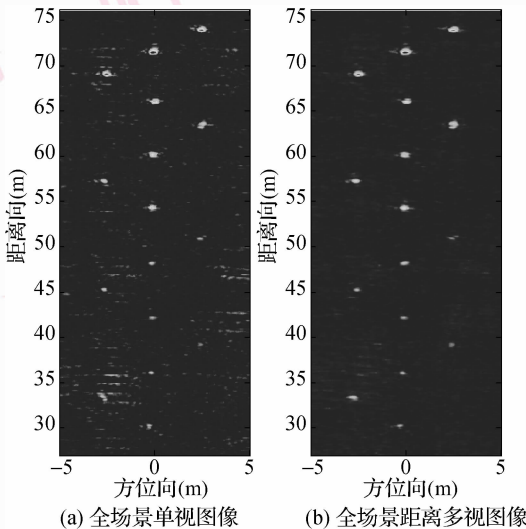


图 5 实测数据的全场景单视和多视图像
Fig. 5 Single frame and its range multi-look image of real data corresponding to the whole region

表 1 距离多视处理前后 ENL, γ_r , SNR 比较

Tab. 1 Comparisons of the ENL, γ_r , and SNR improvement for single and multi-look image

	ENL	γ_r	SNR (dB)
实测单视图像	0.79	3.44	13.78
实测多视图像	4.65	1.71	22.67

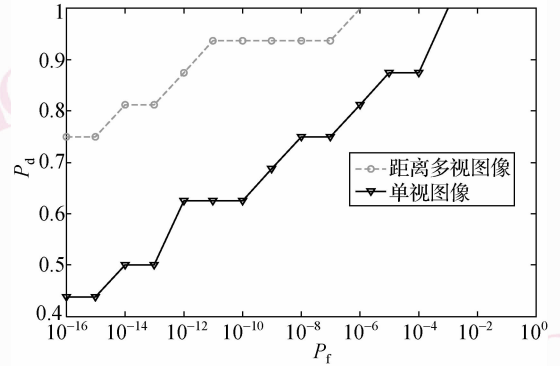


图 6 单视图像和多视图像对应的 ROC 曲线
Fig. 6 ROC curves corresponding to the single and multi-look image

5 结 论

根据车载前视探测系统可在不同观测距离对空间同一区域进行多次观测的特点,提出了一种新的距离多视方法改善图像质量,利用距离子带分割和迭代操作技术实现在线自适应加权距离多视处理,最大程度地提高了图像质量。然后借鉴 TBD 方法的思想,推导了多视图像和单帧图像检测概率、虚警概率和 SNR 间的关系式,并在给定系统探测指标要求下,给出了需要进行积累的最小帧数及相关的影响因素。最后,通过实测数据验证了该方法的正确性及有效性,定量分析了距离多视积累在 SNR 改善和相干斑抑制方面的效果,并利用 ROC 曲线进一步对多视处理前后的检测性能进行了比较。

参考文献 (References)

- Schreiner K. Landmine detection research pushes forward, despite challenges [J]. IEEE Intelligent Systems, 2002, 17(2): 4-7.
- Kositsky J, Cosgrove R B, Amazeen C, et al. Results from a forward-looking GPR mine detection system [A]. In: Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VII [C], Orlando, FL, USA, 2002, 4742:206-217.
- Sun Y, Li J. Time-frequency analysis for plastic landmine detection via forward-looking ground penetrating radar [J]. IEE Proceedings

- Radar Sonar Navigation, 2003, **150**(4):253-261.
- 4 Andrieu J, Gallais F, Mallepeyre V, *et al.* Land mine detection with an ultra-wideband SAR system [A]. In: SPIE Symposium on Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VII [C], Orlando, FL, USA, 2002, **4742**:237-247.
 - 5 Nguyen Lam H, Ton Tuan T, Wong David C, *et al.* Signal processing techniques for forward imaging using ultra-wideband synthetic aperture radar [A]. In: Unmanned Ground Vehicle Technology V [C], Orlando, FL, USA, 2003, **5083**:505-518.
 - 6 Bradley M, Witten T, Duncan M, *et al.* Mine detection with a forward-looking ground-penetrating synthetic aperture radar [A]. In: SPIE Symposium on Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VIII [C], Orlando, FL, USA, 2003, **5089**:334-347.
 - 7 Bradley M, Witten T, Duncan M, *et al.* Anti-tank and side-attack mine detection with a forward-looking GPR [A]. In: SPIE Symposium on Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets IX [C], Orlando, FL, USA, 2004, **5415**:421-432.
 - 8 Wu Xin-wei. Study on Autofocus Technique and Speckle Reduction in SAR Image Formation [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002. [武昕伟. SAR 自聚焦技术及相干斑抑制算法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2002.]
 - 9 Alberto Moreira. Improved multilook techniques applied to SAR and SCANSAR imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1991, **29**(4):529-534.
 - 10 Jin Tian. Research on Theory and Technique of Ultra-wideband SAR Shallow Buried Targets Imaging and Detection [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. [金添. 超宽带 SAR 浅埋目标成像与检测的理论和技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007.]
 - 11 Liu G, Wang Y, Li J, *et al.* SAR imaging for a forward-looking GPR system [A]. In: SPIE Symposium on Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VIII [C], Orlando, FL, USA, 2003, **5089**:322-333.
 - 12 Cook Gerald, Sherbondy Kelly, Jakkidi Shwetha. Geolocation of mines detected via vehicular-mounted forward-looking sensors [A]. In: SPIE Symposium on Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VI [C], Orlando, FL, USA, 2001, **4394**:922-933.
 - 13 Yang Lei. Study on Infrared Small Target Detection and Tracking Algorithm Under Complex Backgrounds [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2006. [杨磊. 复杂背景条件下的红外小目标检测与跟踪算法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2006.]
 - 14 Zhang Fei, Li Cheng-fang, Shi Li-na, *et al.* Effective target tracking from IR image sequence [A]. In: SPIE Symposium on Remote Sensing and Infrared Devices and Systems [C], Changchun, China, 2006, **6031**:1-6.
 - 15 Wei Paul, Zeidler James, Ku Walter. Analysis of multiframe target detection using pixel statistics [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1995, **31**(1):238-247.
 - 16 Askar H, Li X, Li Z. Performance analysis of dim moving point target detection algorithm [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions [C], Chengdu, China, 2002:977-981.
 - 17 Liang Hao-chen, Ni Guo-qiang, Zhu Zhen-fu, *et al.* Analysis of target detection probability in sequence image [A]. In: SPIE Symposium on Infrared Technology and Applications XXVII [C], San Diego, USA, 2000, **4130**:791-799.