

超宽带雷达信号处理技术和实验研究¹

栗毅 匡纲要 郭盛桃 陆仲良

(国防科技大学电子工程学院 长沙 410073)

摘要 针对探测空中目标的超宽带(UWB)/冲激雷达,本文讨论了UWB/冲激雷达的信号处理技术,主要是信号检测和目标特性分析,首先讨论了目标检测技术,提出了用小波变换和高阶谱估计技术在变换域内进行检测的算法;其次讨论了目标特性分析技术,采用了高阶谱估计,提出了一种时域双谱估计算法,它可精确估计复杂形体目标的局部散射中心的分布。最后,结合作者等人研制的冲激雷达实验系统,对上述信号处理方法进行了实验研究,验证了上述信号处理方法的有效性。

关键词 UWB 雷达, 信号检测, 目标特性

中图分类号 TN958, TN911.7

1 引言

超宽带UWB雷达作为一种新的探测技术,已日益受到国内外学者的广泛重视,由于这种体制的雷达发射频带极宽的信号,使其在目标识别、探测隐蔽目标和目标成像等领域显示出巨大的潜力^[1]。在UHF/VHF频段,已研制出机载UWB/SAR成像雷达系统,对树丛隐蔽目标的实验初步显示其威力。在目标特性研究方面,由于它的超宽带和高分辨率特性,可获得复杂目标的精细回波响应,对目标识别极为有利。

对于冲激雷达,常规的载波雷达的信号处理方法不再有效,需要研究新的方法和技术。信号检测是冲激雷达信号处理的基础,然而由于许多未知参数存在,低信噪比以及噪声有可能出现非稳态性,使得信号检测非常困难。这些未知参数包括瞬态回波信号波形,到达时间和信号持续时间。本文讨论了两种新的检测方法:双谱检测算法和基于子波变换的信号检测方法。在UWB目标特性分析方面,提出了一种时域双谱估计算法,利用这一算法除能抑制高斯噪声、提供相位信息外,还可以去除可能存在的复杂目标的冲激响应中的虚假散射中心。

2 信号的双谱检测

二元检测模型如下:

$$\left. \begin{aligned} H_1: & x(t) = s(t) + n(t), \\ H_2: & x(t) = n(t). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

如果噪声 $n(t)$ 是零均值平稳高斯过程,信号 $s(t)$ 的双谱为 $B_s(\omega_1, \omega_2)$,假设信号与噪声是相互独立的,则有如下双谱域的检测问题:

$$\left. \begin{aligned} H_1: & B_x(\omega_1, \omega_2) = B_s(\omega_1, \omega_2), \\ H_2: & B_x(\omega_1, \omega_2) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

¹ 1996-04-10 收到, 1996-11-26 定稿

比较 (1) 式与 (2) 式, 不难看出, 当信号含有非高斯信息时, 双谱的检测特性比能量检测更为有效, 尤其在低信噪比条件下. 对于冲激雷达, 目标回波一般是若干个衰减谐振分量之和, 含有较大的非高斯分量, 因此, 双谱域的检测是有效的.

对于小数据样本, 传统的双谱估计难以达到所需要的分辨率和精度. 而参数法因其克服了小数据样本限制以及对噪声的抑制作用, 在低信噪比下仍能得出较高的双谱估计精度.

通过对信号双谱分析, 可将 (2) 式转换成以下问题:

$$T_c^2 \underset{H_2}{\overset{H_1}{\geq}} T_0^2, \quad (3)$$

其中 $T_c^2 = \sum_{n=1}^P (|u_n|^2 / \sigma_n^2)$, P 为双谱主频域的频率对点数, u_n, σ_n^2 分别为第 n 个频率点的均值和方差的估计值. 门限 $T_0^2 = (1/\sqrt{2})\text{erf}^{-1}(P_F) + \sqrt{(2p-1)/2}$, P_F 为虚警概率. 对于 (3) 式的检测, 可得以下双谱域中的检测概率 [2]:

$$P_D \approx \text{erf}[(T_0^2 - 2P - \lambda)/(2\sqrt{P + \lambda})], \quad (4)$$

其中 λ 为双谱的归一化值.

3 基于子波变换的信号检测 [2]

由于子波变换的频率分辨率是变化的, 非常适于检测冲激雷达的瞬态回波信号. 本文在对 UWB 雷达回波信号进行检测时, 用了两种滤波器结构方式来实现, 第一种是基于正交分解的 Mallat 算法, 本文用的子波为 Daubechies 子波, 另一种方法是 A-trous 算法, 它属于非正交子波分解.

回波 $x(n)$ 的离散子波变换为

$$w(i, n) = w(2^i, 2^i n) = 2^{-i/2} \sum_k \psi^* \left(\frac{k - 2^i n}{2^i} \right) x(k). \quad (5)$$

(5) 式的 A-trous 算法的递归关系为

$$\left. \begin{aligned} x^{i+1}(n) &= \Lambda(h * x^{(i)}(n)), \\ W^{(i)}(n) &= g^* x^{(i)}(n). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$W^{(i)}(n)$ 对应于 (5) 式的 $W(i, n)$, $x^{(i)}(n)$ 对应于 $x(n)$ 在第 i 级尺度的近似表示, 显然 $x^{(0)}(n)$ 即为原信号 $x(n)$. 滤波器 $h(k)$ 是一个插值滤波器, 满足 A-trous 条件:

$$h(2k) = \delta(k) / \sqrt{2}. \quad (7)$$

本文子波函数选用调制高斯 Morlet 子波函数:

$$g(t) = e^{jkt} \cdot e^{-\beta^2 t^2 / 2}, \quad (8)$$

k 为决定窗的调制频率的常数, β 是一正比于分析子波带宽的常数. 在对信号 $x(n)$ 进行分解时, 由于带宽限制, 可能会丢失信号 $x(n)$ 的某些频率成份. 因此, 引入一组 M 个滤波器结构, 以使它能覆盖整个信号频谱的上半部分, 本文中选用 $M = 4$.

Mallat 算法分解是基于塔式分解导出的, 利用了一组共轭滤波器, 其迭代关系为

$$\left. \begin{aligned} x^{(i+1)}(n) &= \Lambda(h^* x^{(i)}(n)), \\ W^{(i)}(n) &= \Lambda(g^* x^{(i)}(n)), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 g, h 是一组共轭滤波器, Λ (表示隔二抽样算子, 本文中 g 选用 Daubechies 4 阶子波对 UWB 雷达信号作分析。

图 1 示出组合目标的子波变换结果。两种方法均能清楚地检测出目标的存在。但 Mallat 算法无法指出目标位置, 这是这一算法的一个缺点。

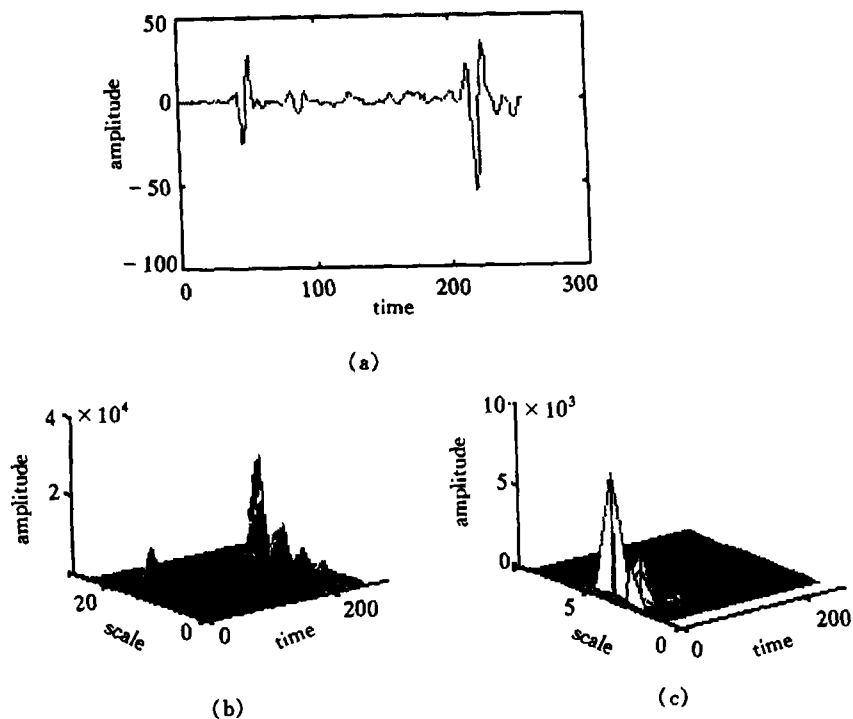


图 1 组合目标的回波及其子波变换图
(a) 目标回波; (b) A-trous 算法; (c) Mallat 算法

4 实验系统和目标回波录取 [3]

图 2 为一设置在微波暗室的全空间冲激雷达实验系统。微波暗室的尺寸为 25m 长, 12m 高, 8m 宽, 目标放置于距离天线 9m 的介质支架上, 暗室六面均采用 46cm 长的尖劈吸波材料, 反射系数在 1GHz 不大于 -40dB 。系统带宽为 200MHz~5GHz。发射机采用 OMNIWAVE 公司的 R-100, 主要指标为脉冲宽度 350ps, 上升时间为 150ps, 脉冲幅度 1000V, 输出阻抗 50Ω , 重复频率 250Hz, 天线为两个并排放置的 TEM 加脊喇叭天线, 具有良好的阻抗特性和波形保真性能, 并有一定的增益。接收机为一自行研制的等取样接收机, 带是 DC~5GHz, 动态范围 50dB, 灵敏度 4mV, 处理器为 4 片 ADSP21020 的并行处理器。

利用这一系统对金属球体 (用于系统校准), 金属板, 介质板, 组合目标和飞机模型进行了测量. 回波经时间加窗, 背景相消和波形几何平均得到目标的回波数据序列. 数据为 10bit 量化, 样本间隔为 0.03247ns, 数据长度为 1024. 该数据用于本文中的检测和目标特性分析.

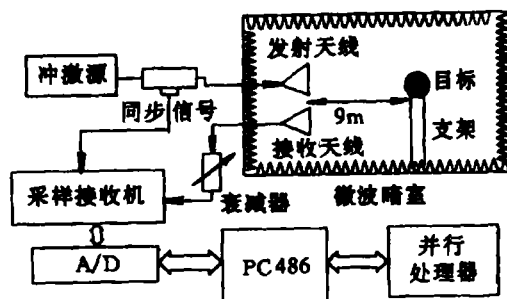


图 2 实验系统框图

5 目标特性分析^[4]

利用超宽带雷达所获得的目标回波, 除包含每个散射中心的响应外, 还存在多散射中心相互作用产生的响应分量. 由于这一原因, 目标的冲激响应的谱分析很难精确表征目标特征. 而双谱能克服常规谱分析存在的缺点又能抑制回波的加性高斯噪声并能提供相位信息, 因此双谱或高阶谱估计适用于分析 UWB 雷达目标特性.

本文仅考虑时域双谱分析, 其定义为

$$B(t_1, t_2) = h(t_1)h(t_2)h(t_1 + t_2), \quad (10)$$

式中 $h(t)$ 为目标冲激响应, 它是利用文献 [2] 中的解卷积算法由实测数据解出来的.

(10) 式给出了目标的时域双谱, 同时也表明了非零双谱是多个散射点相互作用的结果. 双谱峰值为雷达目标散射子分量的相互作用点, 并且峰值的位置对应于两散射点的相互作用位置. 另外, 当冲激响应在 t_p, t_q 和 $t_p + t_q$ 处存在峰值, 并且这些峰值之间相关, 其双谱才会在 (t_p, t_q) 处存在峰值. 但还会有一种情况会使在 (t_p, t_q) 处的双谱不为零, 即在 (t_p, t_q) 处存在目标散射点的镜象散射. 也就是说在双谱图中出现峰值有两个因素: (1) 散射点之间存在多目标相互作用; (2) 在 (t_p, t_q) 处存在镜象散射. 因此要求我们区分上述两种情况, 下面我们通过计算峰值相干函数来区分, 在 (t_p, t_q) 处的相干函数可以表示为

$$\text{bic}(t_p, t_q) = B(t_p, t_q) / \sqrt{S(t_p)S(t_q)S(t_p + t_q)}, \quad (11)$$

式中 $S(t)$ 为目标在 t 处的响应 $H(\omega)$ 的谱密度, 若在 (t_p, t_q) 处的相干函数 $\text{bic}=1$, 则在 $(t_p + t_q)$ 处的响应纯为散射点之间相互作用产生的; 若 $\text{bic} < 1$, 则在 (t_p, t_q) 处的响应可能一部分为相互作用产生的, 另一部分则有可能为目标的镜象散射产生的; 若 $\text{bic} = 0$, 则在 $t_p + t_q$ 处不存在相互作用, 此时的响应纯为镜象散射产生的.

图 3 给出了相距 60cm 的平板与方柱的组合目标的时域双谱图和冲激响应. 图中清楚地显示了两个散射中心, 并且它们之间的距离为 60cm 与实际的两目标之间的距离完全一致.

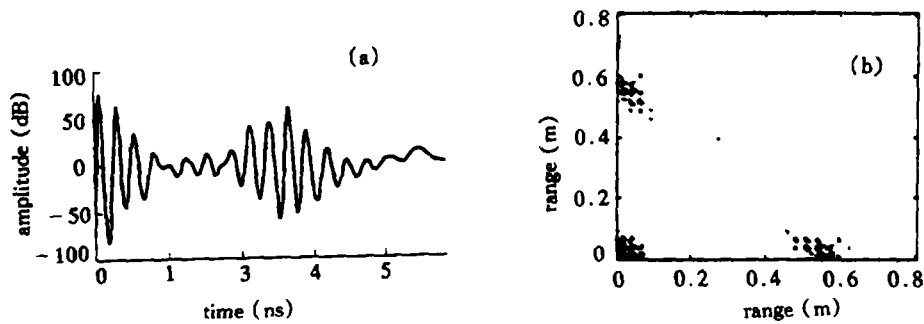


图3 组合目标的回波和时域双谱

6 结束语

当回波信号中含有大量高斯噪声及其它具有对称概率密度的噪声时,利用高阶谱进行信号检测和特性分析显示其独有的优越性,不仅如此,高阶谱更能精确表征目标特征。因为冲激雷达回波是一瞬态过程,当信噪比较低且回波为非稳态情况下,时-频分析,尤其是子波变换在提供回波瞬态信息方面更为有效。

参 考 文 献

- [1] Binder B T. SAR foliage penetration phenomenology of tropical rain forest and northern forest. IEEE 1995 International Radar Conference, Alexandria, Virginia, U.S.A.: 1995, 158-163.
- [2] Forgues M P, Brooks W A. Application of time-frequency and time-scale transforms to ultra-wideband radar transient signal detection. SPIE'93, Vol. 2207, 180-193.
- [3] 陆仲良, 栗毅等. 冲激雷达实验系统总结报告. 技术报告. 长沙: 国防科技大学, 1995, 9.
- [4] 匡纲要. UWB 雷达目标建模和信号设计: [博士论文]. 长沙: 国防科技大学, 1995.

ULTRA-WIDEBAND RADAR SIGNAL PROCESSING AND EXPERIMENT

Su Yi Kuang Gangyao Guo Shengtao Lu Zhongliang

(Institute of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract With reference to the air target detected by ultra-wideband(UWB)/impulse radar, this paper discussed transient signal processing techniques. In weak UWB signal detection, wavelet transforms and high order spectrum estimation were preferred. In target characteristics analysis, a time domain bispectrum estimation algorithm was presented, which could estimate accurately local scattering distribution of complex target. A free field experimental impulse radar system was introduced in this paper. With this system, the response of several canonical target models and scale aircraft were measured and processed.

Key words Ultra-wideband radar, Signal detection, Target characteristics

栗毅: 男, 1961年生, 副教授, 从事自适应信号处理, 超宽带雷达系统技术, 时频/瞬态信号处理等方面研究。

匡纲要: 男, 1966年生, 博士, 从事超宽带雷达信号处理, 超宽带雷达目标特性分析和 SAR 雷达成像技术研究。

郭盛桃: 男, 1964年生, 博士生, 从事瞬态信号检测和超宽带雷达目标特性方面的研究。

陆仲良: 男, 1931年生, 教授, 博士生导师, 从事雷达系统、信号处理等方面的研究。