联合时频域的雷达信号检测研究

丁超¹,张欣²

(1.中国电波传播研究所 青岛分所,山东 青岛,266107;2.海军航空工程学院 青岛分院,山东 青岛,266041)

摘要:联合时频分析是信号处理领域热门的研究方向,相对于传统的单独时域或频域处理,时频变换在 雷达信号分析和处理等方面可以提供更多的信息。作为雷达信号检测的独特工具,研究了雷达信号联合时 频域中的 CFAR 检测方法,并进行了性能分析。

关键词:时频变换; CFAR 检测; 信噪比 中图分类号: TP11 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2011)04-0005-03

Study on Radar Signal Detection of Joint Time-frequency Domain

DING Chao¹, ZHANG Xin²

Qingdao Branch of China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China;
 Qingdao Branch of Naval Aviation Engineering Institute, Qingdao 266041, China)

Abstract: Joint frequency domain is a hot research direction in signal processing field. Compared with traditional time domain or frequency domain, time-frequency transformation can provide more information on radar signal analyzing and processing. As a special way of radar signal detection, CFAR detection method in radar signal joint time-frequency domain was studied. The performance was analyzed.

Key words: time-frequency transformation; CFAR detection; signal to noise

噪声中未知信号的检测与提取是雷达信号处理 中的重要问题。当信号被噪声严重污染,以至于在 时域或频域都无法检测到时,利用时域及频域所确 定的基函数进行时频变换对于检测信号十分有用。 通过时频变换,随机噪声的能量趋于分布到整个时 频域范围,而信号的能量通常集中在有限的时间区 间和频率范围内。因此,联合时频域表示信号和噪 声,噪声中的信号检测就会更加容易。通过应用时 变频率滤波,还可以提高信噪比。

1 雷达信号的联合时频域滤波

1.1 时频域变换

联合时频域变换是为了描述信号的时变频率分 量而发展起来的。分析时变频率分量信号的一种标

收稿日期: 2011-02-10

作者简介: 丁超(1980—),女,山东胶南人,硕士,工程师,主要从事电波传播项目管理工作。

准方法是把时间信号分成许多段,然后将每段信号 作傅里叶变换,称为短时傅里叶变换STFT,即:

$$STFT(t, \omega) = \int s(t') w(t'-t) e^{-j\omega t'} dt'$$
(1)

$$STFT(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} e^{-j\omega t} \int s(\omega') \cdot W(\omega - \omega') e^{-j\omega' t} d\omega'$$
(2)

式中:t为时间; ω 为角频率; s(t')为被变换时 间函数, 变换用的基函数为 $w(t'-t)\exp(-j\omega t')$, 在 复正弦函数基础上增加了一个时间窗函数; $s(\omega')$, $W(\omega-\omega')$ 分别为函数s(t), w(t)的傅里叶变换。 因为在时间域不再是无限长, 所以可以监控信号频 谱作为时间的函数如何变化, 这是通过以时间 t 为函 数的窗口移动完成的, 从而得到原始时间信号的二 维联合时频域表示式。式(2)是 STFT 在频率域的表 示式, $W(\omega-\omega')$ 是w(t)的傅里叶变换。根据测不 准原理, 时间窗宽度与频率窗宽度成反比, 因此时间 域和频率域的分辨率不可兼顾, 而且在窗口平移过 程中, 宽度始终保持不变, 从而在整个时频平面上得 到固定的分辨率。

为了削减谱图中的旁瓣干扰,采用高斯窗函数 能够得到最好的时频效果,这种STFT被称为Gabor 变换,令:

$$w(t) = \frac{1}{\pi^{1/4}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \Leftrightarrow$$
$$W(\omega) = (2\sigma)^{1/2} \pi^{1/4} \exp\left(-\frac{\sigma^2 \omega^2}{2}\right) \tag{3}$$

式中: σ²为方差。窗口的大小限制了 Gabor 变 换谱图的分辨率,而小波变换的基函数宽度可根据 频率参数改变,从而产生时频平面的可变分辨率特 性,即在一个域中得到可变分辨率,在另一个域中可 得到多分辨率。由于具有十分严格的栅格形式,小 波的应用只是时频分析朝着可变分辨率发展中的一 步,在很多时候需要根据信号分量的特点来灵活地 调整时频平面分辨率。为了达到这一目的,许多文 献提出了若干自适应时频表示法,其中最著名的是 自适应高斯表示法¹¹和匹配跟踪算法¹²。

1.2 雷达信号的时变频率滤波

传统的傅里叶变换在时域和频域是一对一的映 射关系,但是对于时频变换来说,时频域和时域之间 一般不保证完全一对一的映射关系,这就意味着滤 波后的时频逆变换不一定落在要求的时频区域,从 而出现了时频综合问题。对给定时频域中的一段区 域,可以通过2种方法解决这个问题:1)最小二乘 法,即找出一个时域信号,使信号的时频变换与期望 的时频分布之间的均方误差最小;2)使用迭代时变 滤波。对于后者,首先对含噪信号进行时频变换(如 Gabor变换),然后用一个合适的时变频率滤波器来 提取属于信号的时频系数,接着进行时频逆变换得 到一个时频滤波信号,完成了时频滤波过程的第一 次迭代,然后可以用相同的方法进行更进一步的迭 代。文献[3]证明了时变滤波的第一次迭代就是最小 二乘法,进一步的迭代将改善最小二乘法。

2 联合时频域中的CFAR检测

为了检测淹没在噪声中微弱的目标信号,雷达通 常是根据恒虚警率要求设置一个检测门限,若雷达接 收机观测的回波信号振幅超过门限就认为存在目标, 而低于门限则认为是噪声,即恒虚警率检测CFAR。 由于雷达回波信号通常是统计特性不稳定环境中的 未知信号,虚警率是变化的,因此,自适应CFAR在各 种不同背景噪声环境中就显得相当有用。自适应 CFAR方法从测试单元的邻近单元来估计背景噪声 或杂波分布统计特性,然后基于估计值来设置一个检 测阈值,以判断测试单元是否属于信号。

为了根据要求的虚警概率确定出CFAR 阈值, 需要确定噪声的统计分布规律。在许多实际情况 中,时频域中背景噪声的统计振幅分布可以很好地 近似为瑞利分布,表示如下:

$$p(x) = \frac{x}{\mu^2} \exp\left(-\frac{x}{2\mu^2}\right)$$
(4)

式中: μ 是随机过程的基本数字特征量,与均值 的关系是 $\overline{\mu} = \sqrt{\frac{\pi}{2}\mu}$;p(x)为瑞利分布的概率密度 函数,在均值两侧的积分值相等。

背景噪声的分布可以通过计算联合时频域中噪 声区域观测波形的振幅分布来获得。图1为在雷达 接收机中通过包络检波器后观测波形的分布,它服 从瑞利分布,均值为0.26,所以CFAR阈值可以通过 瑞利分布来确定。因此利用CFAR能够检测出联合 时频域中的背景噪声。在时频域中丢失的点的个数 与要求的虚警率有关,那些低于CFAR阈值的点被 认为是噪声,而其他所有高于CFAR阈值的点被认 为是信号加上噪声。



图1 在联合时频域中经过包络检波器后观测噪声的分布

Fig. 1 Noise distribution through envelope detector in joint time-frequency domain

噪声中检测未知信号的过程如图2所示,检测 过程如下:



图2 联合时频域CFAR检测结构框图

Fig. 2 CFAR detection block diagram for joint time-frequency domain

1) 计算观测波形的时频域系数:

 $C_{m,n} = \langle x(k), g_{m,n}(k) \rangle k$ (m=1,2,...,M;n=1, 2,...,N) (5)

式中:k为时间采样标号; $g_{m,n}(k)$ 为时频域基函数,如Gabor函数; $<x(k), g_{m,n}(k)>表示 x(k)与 g_{m,n}(k)$ 的内积,给出了波形x(k)的时频系数; $C_{m,n}$ 是 $M \times N$ 大小的时频系数阵列,M是时域采样点数,N是频域采样个数。

 2)从只含噪声的联合时频区域中确定瑞利分 布的均值μ。

3)根据给定的虚警概率 Pfa计算 CFAR 的阈值 Tho

$$Th = \sqrt{2\ln(1/P_{fa})} \tag{6}$$

4) 确定出那些大于阈值的时频系数*C_{m,n}*,并将 其余的系数置为0。

$$\tilde{C}_{m,n} = \begin{cases} C_{m,n} & C_{m,n}/\mu > Th \\ 0 & C_{m,n}/\mu \leqslant Th \end{cases}$$
(7)

5)利用CFAR检测到的时频系数 $C_{m,n}$ 进行联合时频逆变换重建信号波形。

3 信噪比的改善

时频域变换后噪声的能量分布在整个时频域, 信号的能量通常集中在有限的时间间隔和频带内。 特别是对于现代雷达采用的线性调频信号,与单独 时域或者频域相比较,在联合时频域中更容易从噪 声背景中识别出来。可以证明,对于零均值、方差为 σ²的加性高斯白噪声中的多分量线性调频信号,矩 形窗的STFT变换的信噪比与时域信噪比相比大于 等于*N/K*的阶,即:

$$\frac{SNR_{\rm STFT}}{SNR_{\rm T}} \ge O\left(\frac{N}{K}\right) \tag{8}$$

式中:N是短时间窗口中的采样个数;K是多分 量信号中的分量个数。可见,为了提高时频域中的 信噪比,要求有更高的采样率以及更少的分量数。 而且,调频斜率必须在一定的范围内,不能过大或过 小。文献[3]中提出,调频斜率的范围为:

 $1/(0.8 \sqrt{2\pi})^2 < \max_{1 \le k \le k} |\eta_k| < 1.28\pi$ (9) 式中: η_k 为第 k个信号分量的线性调频斜率。

4 结语

当雷达信号呈现时变特性时,在联合时频域中 表示强度或能量分布的变换是最理想的变换。通过 在时频域设置门限,检测并判断系数是否属于信号, 然后用检测到的时频系数做时频逆变换提取信号, 从而将 CFAR 检测拓展到联合时频域,提高了信噪 比。时频变换作为一种有用的工具,在雷达目标后 向散射特征分析与提取、机动目标图像聚焦、雷达成 像、ISAR 运动补偿以及微多普勒分析等方面将发挥 重要的作用。

参考文献:

 QIAN S G, CHEN D. Signal Representation using Adaptive Normalized Gaussian Functions[J]. Signal Processing, 1994, 36(3):1-11.

(下转第99页)

3.3 通风处理

为了使得屏蔽室达到预期的屏蔽效能,又能保 证良好的房内新风补偿,采用蜂窝状截止新风波导 窗,安装时与屏蔽层有良好的电接触,如图2所示。



图 2 波导通风窗 Fig. 2 Waveguide hopper windows

3.4 入户线缆及管线处理

屏蔽室的通电采用高插入低损耗滤波器,频率为100 kHz~30 MHz时插入损耗为60 dB,频率为30 MHz~18 GHz时插入损耗为70 dB。滤波器安装在屏蔽体外墙,性能稳定、可靠,屏蔽指标满足GB 12190—2006 中的A级标准。安装如图3所示。



图3 电源滤波器 Fig.3 Power source filter

3.5 涂层型屏蔽室的测试与后期施工

涂层型屏蔽的测试需要在涂层完全干燥后进

(上接第7页)

- [2] MALLAT S G, ZHANG Z. Matching Pursuits with Time-Frequency Dictionaries[J]. IEEE Transaction Signal Processing, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [3] XIA X G, WANG G Y. A Quantitative Signal-to-Noise Ratio

行,将频谱分析仪、信号源以及配套振子天线按GB 12190—1990的要求对屏蔽室进行屏蔽效能评估。 普通的建筑物在涂刷电磁屏蔽涂料后,屏蔽效能在 40 dB以上,表明可以屏蔽掉99%的能量,大大提高 了建筑物内电子设备抵抗电磁干扰和防止电磁泄露 的能力。屏蔽室的后期装修可以采用涂刷内墙涂料 与贴壁纸,应注意在施工过程中对现有涂层的保护。

4 结语

针对重要场所的电磁防护已经引起高度重视, 但须根据场所对屏蔽效能的不同要求而采用不同的 防护手段和措施。金属板屏蔽室适合用在屏蔽效能 较高的场合,如C级、D级屏蔽室,其施工工艺复杂、 周期长、成本较高。对屏蔽效能要求不高的场所,涂 刷电磁屏蔽涂料具有施工简便、造价低的特点,需做 好电磁屏蔽门、窗以及通风处理才能保证良好的电 磁屏蔽效能。因此,在决定采用何种电磁防护手段 时,需根据应用场合、屏蔽要求等条件具体论证。

参考文献:

- [1] 赵立华,刘容平. 计算机的电磁泄露及防护技术[J]. 信息 网络安全,2002(3):39-40.
- [2] 冯立东,龚旭. 筑起雷达的铜墙铁壁——反辐射导弹对 抗技术综述[J]. 国防科技,2004(1):23—26.
- [3] 刘小强,魏光辉,潘晓东,等.现代战场电磁环境与电磁 屏蔽技术[J].装备环境工程,2007,4(1):1-3.
- [4] 张松,李永,刘增堂.水性镍系电磁屏蔽涂料的制备及导电性能研究[J].电子元件与材料,2006,25(10):65-67.
- [5] 李永,张松,黄洁,等.水性镍系内墙电磁屏蔽涂料[J].建 筑材料学报,2007,10(6):754—757.
- [6] LI Yong, CHEN Chang-xin, ZHANG Song, et al. Electrical Conductivity and Electromagnetic Interference Shielding Characteristics of Multiwalled Carbon Nanotube Filled Polyacrylate Composite Films [J].Applied Surface Science, 2008, (254):5766-5771.

Analysis for ISAR Imaging Using Joint Time-Frequency Analysis-Short Time Fourier Transform[J]. IEEE Transaction On Aerospace and Electronic Systems, 2000, 54 (2):397-415.