

文章编号: 1001-2486 (2001) 04-0102-05

低截获概率雷达信号的循环谱相关函数检测方法分析*

黄春琳, 姜文利, 周一宇

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 给出了一些噪声、干扰及低截获概率雷达信号的循环谱相关函数, 分析了其在噪声与干扰中检测的优越性。对循环谱相关函数与 Wigner-Ville 分布、解线调、模糊函数进行了比较, 分析了它们的一致性, 并比较了循环谱相关函数的几种主要估计算法。从这些分析中可知, 循环谱相关函数是检测低截获概率雷达信号的有效方法, 抗干扰能力强, 并具有实时处理的潜力和可能性。

关键词 循环谱相关函数; 低截获概率(LPI); 雷达信号; 检测

中图分类号 TN974 **文献标识码** A

Analysis of Detection of LPI Radar Signals Using SCF

HUANG Chun-lin, JIANG Wen-li, ZHOU Yi-yu

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The SCFs of some noise, interfering and LPI radar signals are illustrated, the performance advantages of using SCF to detect LPI signals in noise or interference environments are analyzed. The SCF is also compared with Wigner-Ville distribution, dechirping and ambiguity, the equality among them is found. Moreover, several SCF algorithms are evaluated. It can be evidenced that the SCF is an efficient method of detection LPI signals, which has the good performance of resistance against the interference and the capability of realizing real time detection.

Key words SCF; LPI; radar signals; detection

目前低截获概率技术(LPI)得到迅速发展并广泛运用于各种新式雷达, 这些技术使雷达信号具有良好的抗干扰性与隐蔽性, 使传统的截获接收机难以对其检测与跟踪。传统的检测器一般将雷达信号建模为平稳过程, 多采用能量辐射计, 这种技术对能量时变的噪声或存在窄带干扰的情况不能有效检测。事实上, 大多数雷达信号更合适的信号模型应是循环平稳过程, 故可利用循环谱相关函数(SCF)进行检测。循环谱相关函数能提高对信号的分辨能力, 含有比功率谱(PSD)更多的信号特征^[7-9], 可分离低截获概率雷达信号与噪声、干扰信号, 提高信号检测能力, 还能有效地进行雷达信号的参数估计与识别。循环谱相关函数是对信号不同频率部分进行相关, 从另一个角度出发, 循环谱相关函数实际上是对信号的相关函数加时变相位旋转因子使其变为同相, 这能使非平稳的雷达信号实现相干累积, 从而提高输出信噪比, 可见循环谱相关函数是一种低截获概率雷达信号的有效检测方法。

1 噪声、干扰及低截获概率雷达信号的循环谱相关函数

$$\text{循环谱相关函数为: } S_x^\alpha(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_x^\alpha(\tau) \cdot e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

其中 $R_x^\alpha(\tau)$ 是循环自相关函数(CAF): $R_x^\alpha(\tau) = \langle R_x(t, t+\tau) \cdot e^{-j2\pi\alpha t} \rangle_t$, $\langle \rangle_t$ 表示对时间 t 取均值, $x(t)$ 为输入信号, α 为循环频率, $R_x(t, t+\tau)$ 是自相关函数。一般采用循环频率 α -谱频率 f 的双频平面来表征循环谱相关函数。下面将给出一些噪声、干扰和低截获概率雷达信号的循环谱相关函数, 便于后面的分析。

对于平稳噪声 $n(t)$, 包括高斯噪声和非高斯噪声, 其循环谱相关函数在非零循环频率处为零, 仅在循环频率 $\alpha = 0$ 处有值, 表达式如下:

* 收稿日期: 2001-04-09

基金项目: 国防科技重点实验室基金资助项目(99JS05.4.1.KG0119)

作者简介: 黄春琳(1973-), 男, 博士生。

$$S_n^\alpha(f) = \begin{cases} N(f)/2 & \alpha = 0 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $N(f)/2$ 为平稳噪声的功率谱密度函数。白噪声是平稳噪声的一种特例,其循环谱相关函数在循环频率 $\alpha = 0$ 处为恒定值 $N_0/2$ (该值为白噪声的双边功率谱密度),在非零循环频率处则为零,如图 1 所示。

对于干扰信号,这里将介绍噪声调幅干扰信号 $j(t) = [J_0 + u_n(t)] * \cos(2\pi f_0 t + \theta_0)$,其中 $u_n(t)$ 是调制噪声,是均值为 0 的平稳随机信号, θ_0 为初相, f_0 为载频。其循环谱相关函数为:

$$S_j^\alpha(f) = \begin{cases} \frac{1}{4} J_0^2 \cdot e^{\pm j2\theta_0} \cdot \delta(f) + \frac{1}{4} J_0^2 \cdot e^{\pm j2\theta_0} \cdot S_u(f) & \alpha = \pm 2f_0 \\ \frac{1}{4} J_0^2 [\delta(f - f_0) + \delta(f + f_0)] + \frac{1}{4} [S_u(f - f_0) + S_u(f + f_0)] & \alpha = 0 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $S_u(f)$ 为调制噪声功率谱密度函数。从上式不难看出,噪声调幅干扰信号是非平稳信号,图 2 给出该循环谱相关函数双频图。

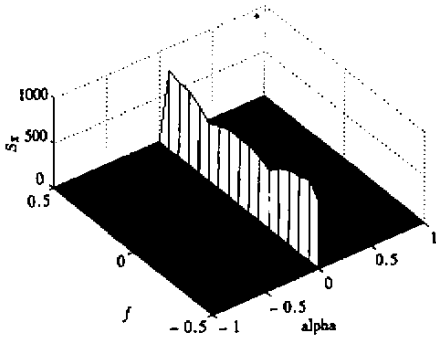


图 1 高斯白噪声的循环谱相关函数

Fig.1 The SCF of Gaussian white noise

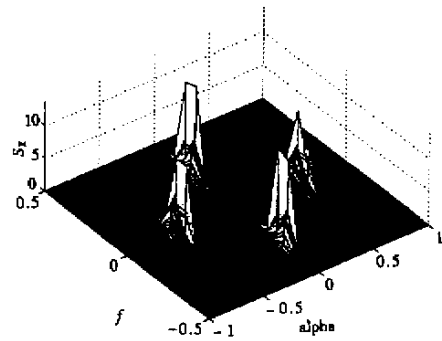


图 2 噪声调幅干扰的循环谱相关函数

Fig.2 The SCF of noise-amplitude-modulated interference

编码信号是低截获概率雷达信号的常用信号形式,这里以 BPSK 调幅编码信号进行说明,其表达式

为 $S(t) = \sqrt{2P} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n q(t - nT_c - t_0) \cos(2\pi f_0 t + \theta_0)$, 式中 P 为平均功率, θ_0 为初相, t_0 是初始时间偏移, f_0 为载频, a_n 是在 ± 1 值上随机分布的随机变量, $q(t)$ 为单位幅度且脉宽为 T_c 的矩形脉冲。其循环谱相关函数为:

$$S_s^\alpha(f) = \begin{cases} \frac{P}{2T_c} \left[Q(f + \frac{\alpha}{2} + f_0) Q(f - \frac{\alpha}{2} + f_0) + Q(f + \frac{\alpha}{2} - f_0) Q(f - \frac{\alpha}{2} - f_0) \right] & \alpha = \frac{k}{T_c} \\ \frac{P}{2T_c} Q(f + \frac{\alpha}{2} + f_0) Q(f - \frac{\alpha}{2} - f_0) & \alpha = \frac{k}{T_c} - 2f_0 \\ \frac{P}{2T_c} Q(f + \frac{\alpha}{2} - f_0) Q(f - \frac{\alpha}{2} + f_0) & \alpha = \frac{k}{T_c} + 2f_0 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $Q(f) = T_c \text{sinc}(fT_c)$ 是 $q(t)$ 的傅氏变换, k 为整数,图 3 给出了该循环谱相关函数的双频图。

需要说明的是,图 1、图 2 及图 3 中的循环谱相关函数,都是采用 FFT 累加算法^[1,2,7]估计得到。

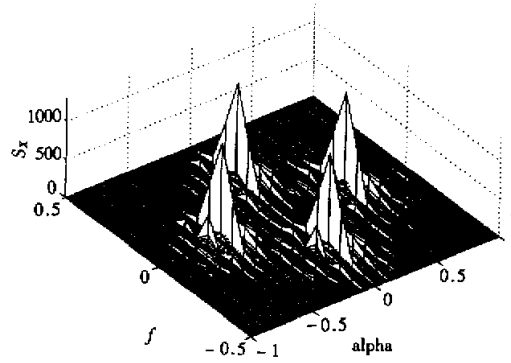


图 3 BPSK 编码信号的循环谱相关函数

Fig.3 The SCF of BPSK signal

2 循环谱相关函数对低截获概率雷达信号检测分析

2.1 循环谱相关函数对平稳噪声与干扰的抑制分析

由(4)式和图 3 可看出,编码信号的循环谱相关函数在 $\alpha = k/T_c$ 和 $\alpha = \pm 2f_0 + k/T_c$ 上有突出的谱峰,若在信号中叠加的是平稳噪声或近似平稳噪声,由于平稳噪声或近似平稳噪声的谱相关函数主要集中在零循环频率处(如图 1 所示平稳高斯白噪声的谱相关函数),对非零循环频率处的信号特征干扰较小。由于低截获概率雷达信号输入信噪比一般很低,零循环频率处的信号特征有可能完全被噪声淹没,这种情况采用能量辐射计效果将会较差。尤其在噪声功率随机变化时,由于噪声功率不可预知,很难在零循环频率上对噪声抑制,故能量辐射计的检测性能要受很大影响。若充分利用非零循环频率处的信号特征,则可提高检测性能,这体现了循环谱相关函数在对低截获概率雷达信号检测上的优越性^[3,8,9]。

若存在与雷达信号频带相重叠的干扰信号时,由于干扰功率一般高于信号功率,在功率谱上无法分辨出雷达信号,此时传统的能量辐射计无法进行工作。由(3)式和图 2 的循环谱相关函数,不难看出噪声调幅干扰信号仅在零循环频率和双倍载频非零循环频率处有谱峰,这样对其它非零循环频率处雷达信号特征不会有影响,若干扰信号载频未对准雷达信号载频,则双倍载频循环频率处的雷达信号特征同样不会受很大影响。这样能将雷达信号与干扰信号分离,可实现对低截获概率雷达信号的有效检测,这也说明利用循环谱相关函数的检测器有较强的抗噪声调幅窄带干扰能力。

从另一个角度来看,循环谱相关函数实际是在不同循环频率上,对输入信号的相关函数 $R_x(t, t + \tau)$ 乘上不同的时变旋转因子 $e^{j2\pi\alpha t}$,使得信号的相关函数在相位上达到或接近一致,这样可在不同循环频率上实现相干累积,使得输入信号能在某些循环频率处出现谱峰。正因为能实现相干累积,故可通过增加相干累积时间,以达到有效检测低截获概率雷达信号的目的。

2.2 与 Wigner-Ville 分布、模糊函数、解线调(dechirping)的比较

循环谱相关函数与 Wigner-Ville 分布、传统雷达模糊函数、解线调(dechirping)等都存在内在一致性^[8,10]。循环谱相关函数的周期图估计与 Wigner-Ville 分布存在如下关系:

$$\frac{1}{T}W_{Xt}(u, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{XT}^{\alpha}(t, f) \cdot e^{j2\pi u \alpha} d\alpha \quad (5)$$

式中 $W_{Xt}(u, f)$ 为输入信号的 Wigner-Ville 分布, $S_{XT}^{\alpha}(t, f)$ 是输入信号的循环谱相关函数的周期图估计,上式说明两者实际是关于循环频率 α 的一对傅氏变换对。雷达信号模糊函数与循环谱相关函数的周期图估计存在如下关系:

$$S_{XT}^{\alpha}(t, f) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} \chi_{XT}(\tau, -\alpha) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (6)$$

式中 $\chi_{\chi_l}(\tau, f)$ 为考虑距离分辨率和速度分辨率的模糊函数,由上式可知,雷达模糊函数与循环谱相关函数的周期图估计是一对关于时延 τ 的傅氏变换对。解线调方法是目前在多项式相位信号的检测与参数估计方面用得较多的一种方法,它也与循环谱相关函数存在一致性关系:

$$|F_L(f, v)|^2 = T \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{XT}^a(t, 2\pi f + vu) \cdot e^{j2\pi u a} d\alpha \cdot du \quad (7)$$

等式右边为时域解线调信号的时变功率谱,该功率谱实际为循环谱相关函数的周期图估计关于循环频率的傅氏变换后的积分。

在数学表达式上循环谱相关函数的周期图估计与 Wigner-Ville 分布、模糊函数、解线调具有一致性,这是基于信号具有遍历性,可用时间统计量代替集合统计量,且统计时间 T 足够长的情况下,采用周期图方法来近似估计循环谱相关函数的结果。实际上这四者所反映的物理意义并不相同,循环谱相关函数反映信号在频谱上频移后的相关性,是一种统计特征,而其它三者反映的是非统计特征,如 Wigner-Ville 分布是信号瞬时相关的傅氏变换,而瞬时相关并非统计意义的相关,仅是信号延迟后相乘的结果。大多数低截获雷达信号是循环平稳信号,采用循环谱相关函数能反映出其频谱上的相关性,从另一方面说,即是能更好地实现信号的能量累积。此外,雷达的模糊函数一般不是直接采用输入信号 $x(t)$,而是采用它的复包络,这样在模糊函数平面会丢失一些有用信息,而解线调信号的时变功率谱突出频率的线性调制特征,抑制了其它特征。故循环谱相关函数比 Wigner-Ville 分布、雷达模糊函数、解线调等能更好地反映低截获概率雷达信号特征,能更效地进行实现检测与参数估计。

3 循环谱相关函数的有关估计算法

目前循环谱相关函数的估计算法主要有三种:分段谱相关函数算法(SSCA)、FFT 累加算法(FAM)、瞬时相关函数算法(SCOUT)。分段谱相关函数算法^[1,2,4]是先将信号分割到相同带宽的不同信道,然后对各信道信号进行抽取,通过乘以一个指数因子实现复解调,复解调后的信号实际是信号的循环周期图估计,对复解调后的信号进行内插,并乘上原始信号的复共轭,再作 FFT 变换,即可得到信号的循环谱相关函数估计:

$$S_{XT}^a(n, f)_{\Delta t} = \sum_r X_T(r, f_k) \cdot x^*(r) \cdot g(n - r) \cdot e^{-j2\pi r q / N} \quad (8)$$

式中 $g(n - r)$ 为 pL 点长的平滑窗。该算法通过利用原始信号的复共轭,避免作两维 FFT 运算,但需要对复解调后信号内插,以使其与原始信号等长。FFT 累加算法^[1,2,7]与分段谱相关函数算法不同之处是不采用原始信号的复共轭,而是直接将两个复解调后的信号进行共轭相乘:

$$S_{XT}^a(pL, f_{kl})_{\Delta t} = \sum_r X_T(pL, f_k) \cdot X^*(rL, f_l) \cdot g_d(p - r) \cdot e^{-j2\pi r q / P} \quad (9)$$

式中 $g_d(p - r)$ 为 p 点长的平滑窗。该算法充分利用了 FFT 进行计算,但需要作两维 FFT 运算,所需内存和计算量都较大。瞬时相关函数算法^[6]是先计算时变自相关函数(TCF),时域加窗后对时延作 FFT 变换,然后在频域加窗后再进行 FFT 变换,以得到循环谱相关估计的一种方法。

三种算法的运算量分别是:

$$SSCA_C = [N_a N_f \log_2(N_a) + 8N_a \log_2(N_f) + 2N_a N_f + 12N_a] / 4 \quad (10)$$

$$FAM_C = 6N_f P + PN_f \log_2(N_f) + PN_f^2 + N_f^2 \frac{P}{2} \log_2(P) \quad (11)$$

$$SCOUT_C = [7N_a N_f + N_a N_f \log_2(N_f) + N_a N_f \log_2(N_a)] / 4 \quad (12)$$

其中 N_a 、 N_f 为循环频率与谱频率的分格数, $P = N_a / L$, L 为各信号通道抽取因子。图 4 给出了 $N_a = 64N_f$ 时三种算法计算量关于 N_f 的变化曲线,图中 FAM 算法 L 取 4。由(10)~(12)式可知,SSCA 算法和 SCOUT 算法的运算量与 N_f 近似成平方关系,而 FAM 算法的运算量与 N_f 近似成三次方关系。由图 4 可知, FAM 算法的运算量比其它两种算法要高两个数量级以上,这是因其需要计算两维 FFT。SSCA 算法的运算量最小,这是因其利用了原始信号的复共轭。由图 4 可以看出,在谱频率分辨率要求不很高时,以目前高速 DSP 芯片的处理速度来看,是能承受 SSCA 算法或 SCOUT 算法的运算量。

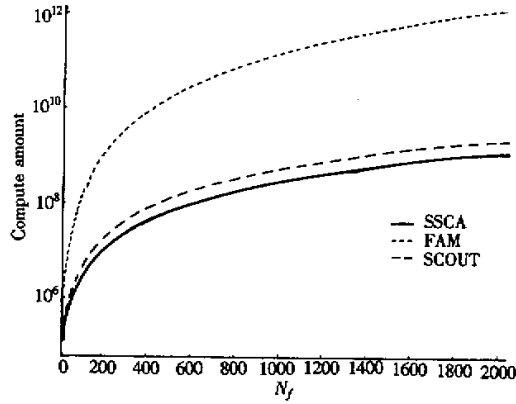


图 4 3 种循环谱相关函数估计算法的运算量

Fig.4 the compute amount of three SCF algorithms

事实上,上述三种算法都可以并行实现,基于目前 FFT 变换硬件实现速度已很快,利用现在迅速发展的 DSP 与 FPGA 技术,设计并行处理系统进行并行计算,实现对循环谱相关函数的实时计算是完全可能的。文[6]介绍了一种采用 7 个 TMS320C40 DSP 并行实现 SCOUT 算法的方案,该方法可在采样率 5kHz 时,实时估计循环谱相关函数而不丢失任何输入采样 这种采样率已足够应付大多数应用,至于雷达信号的检测与侦察,采用更高速的 DSP 或 FPGA,设计更庞大、更复杂的并行系统,相信亦可能实现满足性能指标的实时处理。此外,文[5]提出了利用循环自相关函数的循环周期图(ACP)估计循环谱相关函数,该方法比时域平滑的时变周期图方法更有效,并且其分辨率所受限制更少,但它还未有实现算法。

4 结束语

以上就噪声或干扰中低截获概率信号的检测,分析了采用循环谱相关函数的优越性。循环谱相关函数为二阶循环统计量,相比较而言,高阶循环统计量在抑制非平稳高斯噪声具有更好的性能,但高阶循环统计量需要计算多维 FFT,运算量很大,很难实现实时处理,故循环谱相关函数为更好的选择。总之,可以发现循环谱相关函数是检测低截获概率雷达信号的有效方法,抗干扰能力强,并具有实时处理的潜力和可能性。

参考文献:

- [1] Gillman A M. Non Co-operative Detection of LPI/LPD Signal Via Cyclostationary Analysis[J]. 1999 (AD-A371720) .
- [2] Brown W A. Loomis Jr H H. Digital Implementation of Spectral Correlation Analyzers [J]. in IEEE Trans. Signal Processing. 1993, 41(2) :703-720.
- [3] Izzo L, Paura L, Tanda M. Signal interception in non-Gaussian noise [J]. in IEEE trans. Com. 1992, 40(6) .
- [4] Da Costa E L. Detection and Identification of Cyclostationary Signals [J]. March. 1996 (AD-A311555) .
- [5] Grace K, Gardner W A. Search-efficient methods of detection of cyclostationary signals [J]. in IEEE trans. S. P., 1996,44(5) .
- [6] Goerlich J, Bruckner D, Richter A. Signals analysis using spectral correlation measurement [A]. IMTC/98 Conference Proceeding, 1998,2 :1313-1318.
- [7] Gardner W A. Cyclostationary in communications and signal processing [M]. New York :IEEE, 1994.
- [8] Gardner W A. Signal interception :a unifying theoretical framework for feature detection[J]. in IEEE trans. Com. 1988 36(8) .
- [9] Gardner W A, Spooner C M. Signal interception :performance advantages of cyclic-feature detectors [J]. in IEEE trans. Com.1992 40(1) .
- [10] 张贤达,保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京 国防工业出版社,1999.

