

基于频域对消的噪声调幅干扰抑制算法

杜东平 唐斌

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: 为了有效抑制噪声调幅干扰, 该文通过对数变换, 由信号虚部准确估计干扰信号载频和初始相位, 再对干扰信号进行解调, 利用频域对消方法抑制干扰信号分量。仿真实验显示算法具有较好的干扰抑制效果。

关键词: 噪声调幅; 频率估计; 频域对消

中图分类号: TN974

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)03-0557-03

A High Performance Algorithm of Noise Amplitude Modulation Interference Suppression Based on Frequency Domain Cancellation

Du Dong-ping Tang Bin

(School of Electronic Engineering, UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: In this paper, a high performance frequency domain cancellation algorithm is presented to suppress the noise amplitude modulation interference. By the logarithm transform, the carrier frequency and initial phase of the jamming signal are estimated from the imaginary part of the transformed echo signal including jamming, and then, the echo signal is demodulated with the estimated jamming carrier frequency. Finally, the jamming may be suppressed with frequency domain cancellation. Simulation shows that the proposed method has a low computational cost and high performance.

Key words: Noise amplitude modulation; Frequency estimation; Frequency domain cancellation

1 引言

噪声调幅干扰^[1,2]是雷达对抗中的一种重要干扰方式, 具有信号产生简单, 带宽可变, 压制效果明显等优点, 目前较广泛地应用于对雷达进行瞄准式或复合式干扰。随着干扰技术的发展, 进入雷达接收机的干扰信号能量可超过雷达回波信号达数十分贝以上, 雷达回波信号完全淹没于干扰信号中。在强干扰背景下, 抑制干扰, 等效增强回波信号的信干比, 提高信号处理增益是现代雷达的一个重要抗干扰手段。

在强干扰情况下, 信号处理性能主要取决于干扰的抑制效果。常规信号处理, 主要是基于一定约束准则, 对信号进行滤波处理, 抑制干扰/噪声^[3], 或采取最优准则, 直接检测信号及参数估计^[4], 但是其干扰抑制能力受到诸多限制, 如高斯假设、平稳假设或一定先验信息要求, 且在信干比过低时, 信号处理能力不佳, 且会引入一定信息损失; 基于特定信号形式的处理方法, 如针对LFM信号, 采用分数阶傅里叶变换处理^[5,6], 效果较好, 但受窗函数影响, 信号有一定失真, 且运算量较大; 基于时频分布的信号处理方法^[7], 一般要求正的信干比, 且运算量较大。

本文提出基于频谱对消方法, 针对低信干比情况下的雷达回波信号, 有效抑制干扰分量的方法, 且运算量较小。

2 基于频域对消的干扰抑制

2.1 信号模型

雷达接收机接收信号为

$$x(t) = s(t) + J(t) + n(t) \\ = A(t)\exp(j\omega_c t) + (U_0 + U_n(t))\exp(j(\omega_j t + \phi)) \\ + n(t) \quad (1)$$

其中 $s(t)$ 为目标反射信号, $J(t)$ 为噪声干扰信号, $n(t)$ 为接收机内部热噪声; $A(t)$ 为包含目标信息的回波基带信号, ω_c 为包含多普勒频率的回波信号中频; U_0 为载波电压, 调制噪声 $U_n(t)$ 是零均值、方差为 σ_n^2 的高斯带限白噪声; ω_j 为干扰信号中频, ϕ 为干扰信号 $[0, 2\pi]$ 均匀分布的初始相位。

为了在强干扰条件下实现雷达信号处理, 需要尽可能地抑制干扰信号, 增强接收信号信噪比。考虑基于噪声调幅干扰信号模型, 如果能够准确估计式(1)中干扰信号载波参数(载频, 初相), 并对干扰信号进行解调, 利用解调后干扰与回波信号在频域特点, 则可以实现干扰对消, 达到抑制干扰的目的。

2.2 干扰信号参数估计

对式(1)两边进行对数变换, 并对 $x(t)$ 在 0 点附近做泰勒展开, 得

$$\begin{aligned} \ln(x(t)) &= \ln(s(t) + n(t) + J(t)) \\ &\approx \ln(J(t)) + \frac{1}{J(t)}[s(t) + n(t)] \end{aligned} \quad (2)$$

在强干扰条件下, 式(1)中的干扰信号幅度远大于回波信号和噪声幅度, 式(2)近似成立。

展开式(2)中的干扰项, 有

$$\begin{aligned} \ln(J(t)) &= \ln\left((U_0 + U_n(t))\exp(j(\omega_j t + \phi))\right) \\ &= \ln(U_0 + U_n(t)) + jA(\omega_j t + \phi) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $A(\omega_j t) = \omega_j(t - 2k\pi)$, $t \in (2k\pi, 2(k+1)\pi)$, $k = 0, 1, 2, \dots$ 为锯齿波函数。容易看出, 锯齿波信号 $A(\omega_j t)$ 的频率和初相分别与干扰信号载波频率和初相相等。

式(2)虚部为

$$\xi(t) = \text{Im}(\ln(J(t))) = A(\omega_j t + \phi) + \vartheta(t) \quad (4)$$

其中 $\vartheta(t) = \text{Im}\left(\frac{s(t) + n(t)}{J(t)}\right)$ 为对数变换后信号和噪声部分的虚部。

在强干扰背景下, 锯齿波信号 $A(\omega_j t)$ 幅度远高于 $\vartheta(t)$ 信号幅度, 锯齿波信号频率和初始相位较易估计得到,

$$\hat{\omega}_j = \hat{\omega}_{\xi(t)}, \quad \hat{\phi}_j = \hat{\phi}_{\xi(t)} \quad (5)$$

其中干扰载波频率估计值 $\hat{\omega}_j$ 由其频域的谱峰位置测得, 锯齿波初相 $\hat{\phi}_j$ 由相关法求得。

2.3 噪声调幅干扰抑制

由式(5)得到的干扰信号载波参数估计值对式(1)进行解调, 得

$$y(t) = x(t)\exp(-j(\omega_j t + \hat{\phi}_j)) = y_1(t) + y_2(t) \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} y_1(t) &= A(t)\exp(j(\omega_c - \hat{\omega}_j)t + j\hat{\phi}) \\ &\quad + n(t)\exp(-j(\hat{\omega}_j t + \hat{\phi})), \\ y_2(t) &= U_0 + U_n(t) \end{aligned}$$

一般情况下, 干扰调制频率不能精确对准雷达回波信号频率, $\omega_c \neq \hat{\omega}_j$, 且雷达基带信号 $A(t)$ 为复包络, 从而 $y_1(t)$ 为复信号, 而 $y_2(t)$ 为实信号, 则利用干扰信号及雷达信号的不同频域结构, 对消干扰信号。

对 $y(t)$ 做 Fourier 变换, 有

$$Y(f) = Y_1(f) + Y_2(f) \quad (7)$$

其中 $Y(f) = \text{FT}(y(t))$, $Y_1(f) = \text{FT}(y_1(t))$, $Y_2(f) = \text{FT}(y_2(t))$ 。

在如图1所示的 $Y(f)$ 结构中, 由于 $y_1(t)$ 为复信号, 假设其频谱具有图1所示右半平面的单边频谱结构; $y_2(t)$ 为

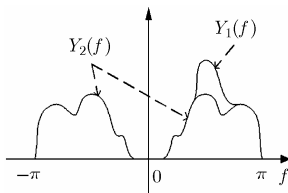


图1 干扰及信号频域示意图

实信号, 具有共轭对称的双边带结构。则

$$Y(f) = \begin{cases} Y_{1,R}(f) + Y_{2,R}(f), & f > 0 \\ Y_{2,L}(f), & f \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中 $Y_{1,R}(f)$ 及 $Y_{2,L}(f)$, $Y_{2,R}(f)$ 分别为 $Y_1(f)$ 与 $Y_2(f)$ 位于左、右频域半平面的信号分量, 且

$$Y_{2,L}(f) = (Y_{2,R}(-f))^* \quad (9)$$

其中 * 表示复共轭。

将 $Y(f)$ 位于左半平面信号减去右半平面信号复共轭, 即可得到干扰抑制后的信号频域分量, 即

$$Y_{1,L}(f) = Y_L(f) - (Y_R(f))^* \quad (10)$$

利用干扰信号频谱的复对称性, 在频域实现干扰对消, 从而得到较纯净的信号频域分量。

3 仿真实验

3.1 实验1

雷达信号为 LFM 信号, 中频信号初始频率 $f_0 = 4\text{MHz}$, 带宽 $B = 2\text{MHz}$, 脉冲宽度 $T_p = 50\mu\text{s}$, 采样频率 $f_s = 20\text{MHz}$; 干扰信号载频 $f_{jc} = 4.5\text{MHz}$, 初始相位 $\phi = \pi/6$, 调制系数 $m_{ac} = 1000$; 信干比 $\text{SJR} = -60\text{dB}$ 。

在强干扰背景下, 式(3)中的锯齿波周期信号受回波信号以及调制噪声影响较小, 锯齿波信号频谱凸现在噪声频谱背景中(如图2), 干扰信号载频估计值比较容易得到。由得到的干扰信号载频, 合成相应的锯齿波信号(初相为0), 并与式(4)所得信号做互相关, 干扰载波的初相可由相关图第1个峰值位置估计得到(如图3)。

采用频域对消方法, 可以得到比较纯净的雷达回波信号(图4), 及较理想的脉冲压缩输出(图5), 干扰抑制效果明显。

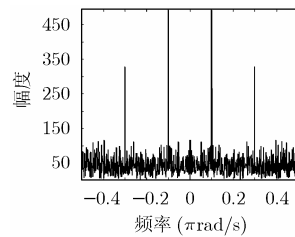


图2 干扰载频频谱图

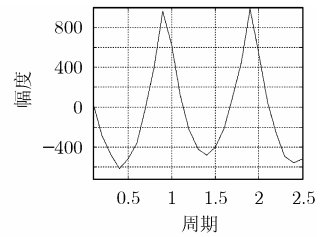


图3 $\xi(t)$ 和 $A(\omega_j t)$ 互相关局部图

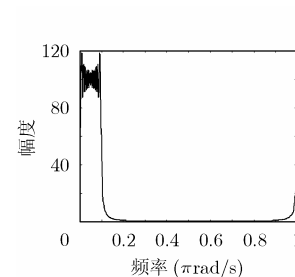


图4 恢复的信号频谱图

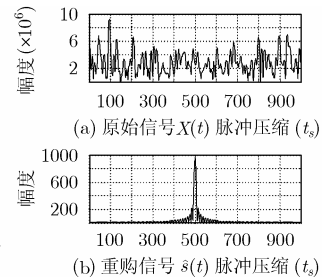


图5 信号处理前后脉冲压缩比较

3.2 实验2

为了提高干扰的有效功率, 噪声调幅干扰信号常采用限

幅输出, 干扰信号频带被展宽, 产生高次谐波; 干扰信号进入雷达接收机后, 谐波成分被滤出, 干扰信号的幅度调制特性不变。实验中设限幅函数为双线性限幅函数; 滤波器带宽和雷达发射信号匹配。雷达信号参数、干扰信号参数同实验 1。实验结果如图 6 所示, 其中图 6(a)为限幅后干扰信号时域波形, 图 6(b)和图 6(c)为干扰抑制后的信号频域波形及脉压输出。

可以看出, 限幅函数不影响干扰载波信号的频率及相位, 本算法对限幅后的调幅干扰信号依然有效; 同时, 即使只有部分干扰信号频段进入雷达接收机, 进入接收机部分信号仍满足调幅干扰特性, 噪声抑制效果明显。

受采样频率及采样点数限制, 频率估计精度为 $\Delta f = f_s / N$, N 为采样点数。图 7 是在不同干扰载波频率估计误差下, 干扰对消后信号的脉压输出。由图可知, 干扰抑制性能对干扰载波频率精度较敏感。为了达到高的信号处理性能, 需采用如 MUSIC, ESPRIT 等的超分辨频率估计算法, 实现干扰载波频率的高精度估计。

4 结束语

针对噪声调幅干扰信号, 本文提出基于对数变换, 估计

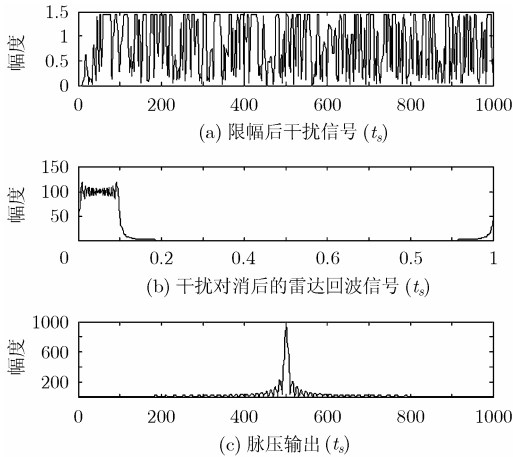


图 6 限幅后干扰抑制输出

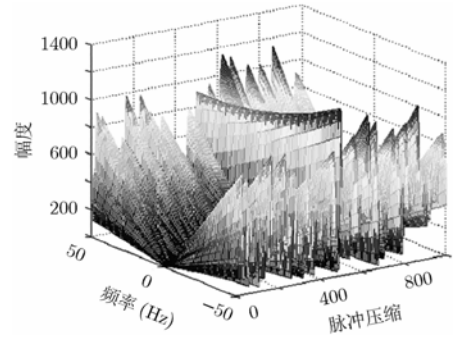


图 7 干扰载频估计误差-脉压图

干扰载频, 实现干扰信号的解调, 再利用频域对消方法抑制干扰信号。本方法计算量小, 处理性能只受干扰载频估计精度影响, 能够工作于较低信干比情况, 具有相当的工程价值。

参考文献

- [1] 刘玉山, 许创杰. 雷达对抗及反对抗. 北京: 电子工业出版社, 1996.
- [2] 赵国庆. 雷达对抗原理. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [3] Simon Haykin. Adaptive Filter Theory, Fourth Edition. Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [4] 何友等. 雷达自动检测与恒虚警处理. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [5] 齐林等. 基于分数阶 Fourier 变换的多分量 LFM 信号的检测和参数估计. 中国科学(E), 2003, 33(8): 749-759.
- [6] Erden M F, Kutay M A, and Ozaktas H M. Repeated filtering in consecutive fractional Fourier domains and its application to signal restoration. *IEEE Trans. on SP*, 47(5): 1458-1462, 1999
- [7] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理. 北京: 国防工业出版社, 1998.

杜东平: 男, 1976 年生, 博士生, 从事雷达抗干扰、雷达干扰建模研究。

唐 斌: 男, 1964 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 长期从事雷达、电子对抗和通信技术与系统研究与教学工作。