

应用瞬时谱分析方法验证近炸引信的数字仿真模型*

李鹏波 谢红卫

(国防科技大学自动控制系 长沙 410073)

摘要 在分析某型近炸引信的工作原理和数字仿真模型的基础上,应用瞬时谱方法分析多普勒信号的瞬时平均频率,验证了近炸引信的数字仿真模型。结果表明瞬时谱是分析多普勒信号这类时变频非平稳随机信号的有效方法。

关键词 近炸引信, 瞬时谱分析, 仿真模型验证

分类号 TN911. 6

Applying Wigner Distribution to Validate the Computer Simulation Model of Proximity Fuze

Li Pengbo Xie Hongwei

(Department of Automatic Control, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract In this paper, the working principle and computer simulation model of proximity fuze of some type are introduced, Wigner distribution is applied to analyse the instantaneous average frequency of Doppler signal, so as to validate the model. The result shows that Wigner distribution is an effective method to process the nonstationary signal with time-varying frequency such as Doppler signal.

Key words proximity fuze, Wigner distribution, simulation model validation.

瞬时谱分析方法之一, Wigner 分布分析能给出信号在任一时刻的频率成分。两个连续信号 $f(t)$, $g(t)$ 的互 WD 变换定义为:

$$W_{f,g}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\omega\tau} f(t + \frac{\tau}{2}) g^*(t - \frac{\tau}{2}) d\tau$$

信号 $f(t)$ 的自 WD 变换可看作信号能量在时间域和频率域分布。此外,除了一个恒定的常数以外,可通过逆 Fourier 变换将原信号从它的瞬时谱得到完全的恢复。即在求解信号的 WD 时,不会损失信号的幅值和相位信息。WD 通过在时间域或频率域里求矩,可以得到信号的瞬时平均功率、平均频率、相频特性等特征。适合于用来处理非平稳信号,特别是近场回波的多普勒信号。本文在验证近炸引信数字仿真模型的过程中,引入瞬时谱分析方法,在时-频域分析了由仿真模型产生的多普勒信号,获得了较好的应用效果。

1 近炸引信的工作原理和数字仿真模型

近炸引信为采用复合调频的连续波主动引信,确定引信起爆定位的方法是利用多普勒频率过零点的原理。近炸引信的工作原理如图 1 所示。

在弹目遭遇段,目标(如飞机)在导弹附近高速通过,引信接收天线接收目标回波,经混频、选频、放大后获得表示目标运动信息的多普勒信号(A、B 两路,主动引信发射两路相互正交的信号,因此接收的多普勒信号为两路)。后续的低频信号处理电路对两路多普勒信号进行一系列处理后,最后获

* 1997 年 6 月 15 日收稿
第一作者:李鹏波,男,1970 年生,博士生

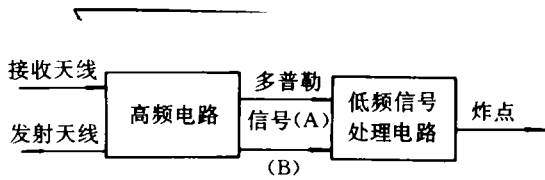


图1 近炸引信的工作原理图

得起爆信号。

近炸引信数字仿真模型包括空中目标模型、高频电路模型、低频信号处理电路模型、杀伤概率模型等。其中高频电路采用分析建模法，后两部分采用CAA即计算机辅助分析法。对空中目标的建模有较大的难度。由于空中交会是对近场目标建模，近场目标如飞机这样的复杂目标，总是含有数十个有显著贡献的“散射中心”和无数个贡献较小的散射源，如：接缝、窗口、铆钉等。因为散射体数目很多，随着视线角度的变化，各部分的贡献不断地同相和反相，产生相互干涉，使总的RCS（雷达有效散射截面 Radar Cross-Section）图形呈现很快的起伏。近场目标电磁散射特性的复杂性，决定了多普勒回波信号的复杂性，后续的电路都是基于对回波信号的处理，最终获得炸点信息。所以空中目标模型是数字仿真的关键，它直接关系到仿真的成败。为检验数字仿真模型的有效性，进行了物理仿真试验，即引信和目标均采用实物，拖动目标以模拟交会过程，然后测量实物引信的输出量（如多普勒信号、炸点信息等）。验模的关键即分析由引信雷达接收空中目标的回波信息而得到的多普勒信号，即检验数字仿真的多普勒信号与物理仿真的多普勒信号的一致性程度，以及依赖于多普勒信号的最终炸点信息的一致性程度。

2 多普勒信号的一致性检验

近场复杂目标电磁散射特性的准确建模是一个难题。引信高频部分输出的是反映近场复杂目标运动特性的多普勒信号，它们是时变频的，起伏强度也随时间大范围变动，所得到的采样序列是强非平稳的。常见的序列平稳化方法，以及基于平稳性条件的时序分析方法、谱分析方法在此难以奏效，所得结论会有很大误差，因此难以引入统计分析方法。

2.1 频域分析

采用WD变换方法来分析比较多普勒信号的时变规律。连续信号 $f(t)$ 的WD变换为 $W_f(t, \omega)$ ， $W_f(t, \omega)$ 为 (t, ω) 平面上的实函数。从时间轴 t_0 处截取，将得到 t_0 时刻信号在角频率 ω 轴上的瞬态能量谱，它沿 ω 轴积分等于信号的瞬时功率 $|f(t)|^2$ 。当 ω_0 取定时，则得到 ω_0 频率分量信号 t 轴的分布和传递，沿 t 轴的积分等于信号的能量谱密度 $|F(\omega)|^2$ 。由此可见， $W_f(t, \omega)$ 可解释为信号能量在 (t, ω) 平面上的分布。通过比较典型时刻实测和计算信号的瞬时 $W_f(t, \omega)$ ，可考察信号能量的时变规律。

关于频率的时变规律，可由 $W_f(t, \omega)$ 的一阶局部矩来刻画：

$$\Omega_f(t) = \frac{1}{2\pi P_f(t)} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega W_f(t, \omega) d\omega \quad (1)$$

其中 $P_f(t)$ 为 t 时刻的瞬时功率， $\Omega_f(t)$ 为瞬时平均频率。

可以证明：

$$\Omega_f(t) = \text{Im} \frac{f'(t)}{f(t)} = \text{Im} \frac{d \ln f(t)}{df(t)} \quad (2)$$

当 $f(t)$ 为复信号时， $f(t) = A(t) e^{j\phi(t)} \Rightarrow \Omega_f(t) = \phi'(t)$ (3)

式(3)表明，当 $f(t)$ 为窄带复信号时， $\Omega_f(t)$ 表示其瞬时角频率。当包络 $A(t)$ 快变时， $f(t)$ 的频谱将覆盖一个有限的频带，但 $\Omega_f(t)$ 能有效地分离快变包络 $A(t)$ 的影响，如实反映相位时变规律。后面的分析将看到，多普勒引信的工作依据正是 $\Omega_f(t)$ 。因此 $\Omega_f(t)$ 对引信仿真具有特别重要的意义。

信号的复包络 $A_f(t)$ 表明振幅的时变规律。为提取 $A_f(t)$ 和 $\Omega_f(t)$ 的信息，计算和比较实测、仿真的 A 路多普勒信号的解析信号。采用高斯窗函数，窗函数为实函数，对 $\Omega_f(t)$ 的估算并不影响。作为实例，图 2、图 3 给出了 09-05 交会条件下（09-05 是试验的编号），实测和仿真所得到 A 路多普勒信号的三维 WD 波谱图。从中可以看出，实测和仿真结果的瞬时谱差异较大。前端仿真模型没有定量有效地再现回波信号的能量分布，但它也反映了近场目标电磁散射的一些基本特点，如能量集中在低频部分，即交会段频率较低，能量较强；重要回波来自少数的离散点（少数谱线峰值轨线）；谱线轨迹的出现和突然消失，表明回波与视角有关等。

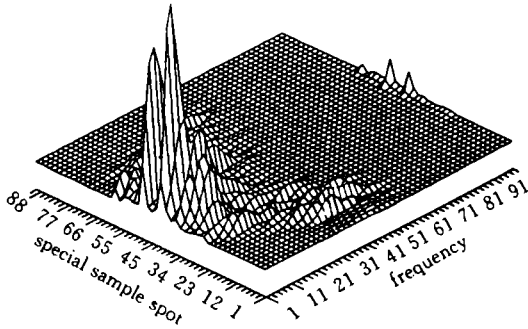


图 2 09-05 实测 A 路多普勒信号 WD 波谱

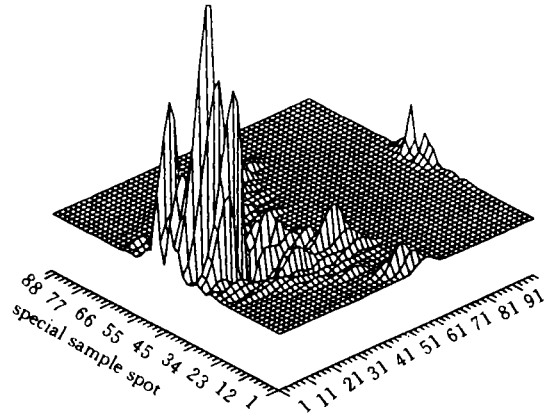


图 3 09-05 仿真 A 路多普勒信号 WD 波谱

通过对包络的比较，可以看出近场目标回波包络是快速闪烁的，对它的准确模拟十分困难，技术难点在于时变 RCS 的计算。对所有交会条件下包络比较的 TIC 指数，分为接近、交会、远离三段分别计算，一般在 0.30 以上，这个结果表明，仿真模型未能在数值上有效地再现回波的振幅时变规律。

2.2 特征有效性分析

引信高频部分输出的两路多普勒信号经过处理，抽取保留的只是过零点信息。多普勒信号的振幅波动信息被丢弃，因而后端处理对前端输出信号有很强的容错性。引信工作仅仅依赖于多普勒信号的相位时变特征，因而仿真模型若能有效再现实测信号的相位时变特征，则它仍然是有效的。

前面分析得到的 $W_f(t, \omega)$ 的一阶局部矩 $\Omega_f(t, \omega)$ 为信号的瞬时平均频率， $\Omega_f(t) = \phi'(t)$ 。由于近场目标回波与视角有关，强散射点的进入和离开，使相位变化过程产生突跳，在频率计算中出现明显的异常值。经过处理后，可得到稳定的频率时变曲线。作为实例，图 4 和图 5 给出了 09-05 和 12-03 交会条件下， Ω_f 的比较图。对所有交会条件下多普勒信号频率特性的一致性比较，TIC 指数一般在 0.10—0.20 之间，所以仿真模型较准确地再现了回波信号的频率时变特征。

多普勒信号的频率时变曲线还只是引信工作所依赖的中间信息，炸点最终依赖的是稳定的频率变号信息（由正变负）。用 WD 互谱来分析多普勒信号，可发现实测和仿真多普勒信号的频率变号时刻基本上一致，但难以用分析方法获得精确的时刻。

2.3 仿真结果有效性分析

仿真最终得到的结果是炸点信息，在低频信号处理模型准确的前提下，仿真结果的一致性说明了仿真模型能准确再现信号频率的变号特征（即引信的最终工作依据），进而证实了仿真模型在近炸引信仿真系统中的有效性。给出不同交会条件下仿真和实测的炸点位置 (F_i 和 $C_i, i=1, \dots, n$)，它具有随机性。若能认定 F_i, C_i 来自同一母体，则说明仿真结果与实测结果是一致的。检验两组子样是否来自同一总体，可用一般的假设检验方法，分为参数检验和非参数检验，参见文献 [3]。假设检验的结果

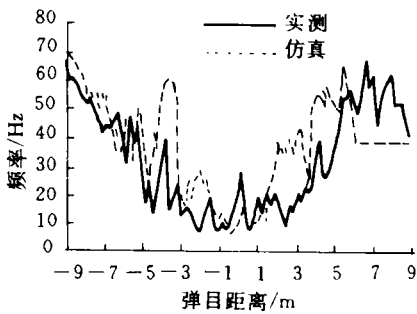


图4 09-05 频率曲线比较

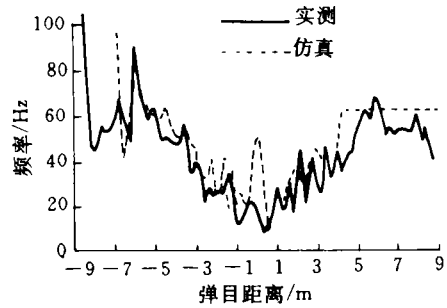


图5 12-03 频率曲线比较

表明, 在置信水平为 0.95 时, 仿真结果与实测结果是一致的。

3 结论

对于近炸引信的数字仿真模型进行了分析, 应用瞬时谱分析方法, 在时间-频率域分析多普勒信号, 验证了数字仿真结果和物理仿真结果的一致性。比较瞬时功率的结果表明, 仿真模型未能定量有效地再现回波信号的能量分布。但低频信号处理电路处理的是多普勒信号的相位时变规律, 比较瞬时频率的结果表明, 仿真模型较准确地再现了频率时变特征。最终炸点依赖的是更稳定的频率变号信息, 用WD互谱来探究A、B两路多普勒信号的比相结果, 可看出相位超前、滞后转变时刻, 仿真和实测的结果是基本一致的。最后对炸点进行了检验, 仿真结果和实测结果是一致的。因此, 对于时变频率的非平稳信号, 瞬时谱分析方法是有效的。

参考文献

- 1 郑治真. 瞬时谱估计理论及其应用. 北京: 地震出版社, 1993
- 2 孟庆丰等. Wigner分布及其在机械故障诊断中的应用. 信号处理, 1990, 6(3)
- 3 张金槐等. 飞行器试验统计学. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995
- 4 Claasen T A. The Wigner distribution --a tool for time-frequency signal analysis. Philips. J. Res, 1980