

## 基于多谐波微多普勒信号分析的目标摄动参数提取方法

苏婷婷 孔令讲 杨建宇  
(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**摘要:** 针对具有微多普勒特征的摄动目标回波信号, 该文提出了目标摄动频率、振幅参数的估计方法。基于摄动目标的多谐波微多普勒回波信号模型, 推导出了谐波频域峰值比与目标振幅比、最大多普勒频偏与目标振幅的定量关系, 实现了由摄动目标回波信号估计摄动参数。该方法适用于具有多谐波微多普勒特征的目标探测。仿真结果表明了该方法的有效性。

**关键词:** 目标检测; 目标摄动参数估计; 多谐波; 微多普勒

**中图分类号:** TN911.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2008)11-2646-04

## Target Parameters Extracted from Multi-harmonic Micro-Doppler Signal Analysis

Su Ting-ting Kong Ling-jiang Yang Jian-yu

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** Based on the echoes with micro-Doppler signatures, a method is proposed to estimate target frequencies and amplitudes. Model echoes as multi-harmonic micro-Doppler one in order to obtain the connection between target amplitude ratio and frequency domain peak ratio and the relationship between maximum Doppler frequency and target amplitudes. Thus, the method estimating target vibrational parameters is deduced. The method is applicable to the target detections as long as the echoes has multi-harmonic micro-Doppler signatures. The theoretical validity is illustrated with simulation results.

**Key words:** Target detection; Target parameters estimation; Multi-harmonic; Micro-Doppler;

### 1 引言

无接触探测在搜救、反恐、远程医疗、损伤检测等方面有着广泛的应用。其探测机理是利用目标摄动对探测信号回波的相位调制, 对回波进行微多普勒分析, 从而实现对目标的探测和摄动参数估计。如何从回波中提取更多的目标特征信息以实现强杂波抑制、弱信号检测, 并进一步实现目标摄动参数估计、目标分类、状态分析等, 已引起各国研究人员的重视。

Greneker等人根据回波的微多普勒特征, 提取频域峰值特征, 用于目标频率估计<sup>[1]</sup>, 并利用微多普勒信号周期变化的平稳性, 研究如何在远程医学和测谎中进行目标探测和特征提取<sup>[2, 3]</sup>。Chen对微振动引起的微多普勒效应进行了建模, 并利用时频分析研究了具有微多普勒特征的回波频率随时间变化的特性<sup>[4]</sup>。Bugaev, Chapursky等人把具有微多普勒特征的回波建模为双谐波相位调制信号, 对生命迹象探测进行了仿真<sup>[5]</sup>。Thayaparan等人利用回波中的最大多普勒频移特征, 研究了引起单谐波相位调制微多普勒信号的目标摄动幅度特性<sup>[6]</sup>。这些研究尚未充分利用回波的微多普勒特征,

对具有多谐波相位调制特征的摄动目标回波信号进行摄动参数估计。

本文首先将摄动目标回波信号建模为多谐波相位调制信号, 并用贝塞尔函数展开, 得到多谐波微多普勒信号模型; 再根据信号模型分析了回波信号谐波频域峰值比与目标摄动幅度比、信号最大多普勒频偏与目标摄动幅度的定量关系; 然后归纳出利用信号频谱峰值位置、幅度比, 以及信号最大多普勒频偏, 联合求解出目标摄动频率和振幅参数的方法。

### 2 微多普勒信号和多谐波相位调制模型

实际中的目标摄动, 例如生命迹象探测中目标的呼吸、心跳等, 大多具有多个较稳定的不同频率和摄动幅度(可看成多个谐波), 对回波信号的影响可以较精确地用多谐波相位调制模型来描述。

当采用雷达作为探测器, 目标表面与雷达接收机之间的距离可以表示为  $r(t) = r_0 + \Delta r(t)$ 。其中,  $r_0$  为平均距离,

$$\Delta r(t) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad \omega_i = 2\pi f_i, \quad A_i \text{ 和 } \varphi_i \text{ 分别是谐}$$

波  $i$  的频率、振幅和初始相位。当发射信号为  $s_0(t) = U_0 e^{j\omega_0 t}$

时, 回波可表示为

$$s(t) = \gamma U_0 e^{j\omega_0 t - j\varphi_0 - j2k\Delta r(t)} \quad (1)$$

式中  $k = 2\pi / \lambda$  是波数,  $\lambda$  是波长,  $\varphi_0 = 2kr_0$ ,  $\gamma$  为衰减因子。

不失一般性, 考虑双谐波的情况, 取  $N = 2$ , 则回波经过混频、归一化、去直流后可以得到

$$s(t) = \exp\{-j\varphi_0 - j2k(A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2))\} \quad (2)$$

利用复指数的傅里叶级数表达式, 并用贝塞尔函数化简为<sup>[7]</sup>

$$s(t) = e^{-j\varphi_0} \sum_{m_1, m_2 = -\infty}^{+\infty} J_{m_1}(2kA_1) J_{m_2}(2kA_2) \cdot \exp[-jm_1\varphi_1 - jm_2\varphi_2 - j(m_1\omega_1 + m_2\omega_2)t] \quad (3)$$

其傅里叶频谱为

$$S(\omega) = |S(\omega)| \exp(-j\varphi_0 - m_1\varphi_1 - m_2\varphi_2) \quad (4)$$

其中

$$|S(\omega)| = 2\pi \left| \sum_{m_1, m_2 = -\infty}^{+\infty} J_{m_1}(2kA_1) \cdot J_{m_2}(2kA_2) \delta(\omega + m_1\omega_1 + m_2\omega_2) \right| \quad (5)$$

### 3 微多普勒参数与目标摄动参数的关系

回波信号中的微多普勒特征是由目标摄动产生的, 因此, 信号的微多普勒参数与目标摄动参数间必然存在相应的定量关系。

#### 3.1 谐波频域峰值比与目标摄动幅度比

以生命迹象探测中的呼吸、心跳信号为例, 正常成年人的心跳频率在  $1 \sim 2\text{Hz}$ , 呼吸频率在  $0.3 \sim 0.5\text{Hz}$ , 摄动幅度比在  $2 \sim 5$  之间。所以, 完全可以通过合理选择观测时宽或频率分辨率, 采用加窗处理等方法使两个谐波信号在频域的相互影响可以忽略。这时, 利用式(5), 两谐波频域峰值比 (Frequency Domain Peak Ratio, 即 FDPR) 为

$$\text{FDPR} = \frac{|S(\omega_1)|}{|S(\omega_2)|} = \frac{\left| \sum_{m_1, m_2 = -\infty}^{+\infty} J_{m_1}(2kA_1) J_{m_2}(2kA_2) \delta(\omega_1 + m_1\omega_1 + m_2\omega_2) \right|}{\left| \sum_{m_1, m_2 = -\infty}^{+\infty} J_{m_1}(2kA_1) J_{m_2}(2kA_2) \delta(\omega_2 + m_1\omega_1 + m_2\omega_2) \right|} \quad (6)$$

由于目标摄动幅度  $A_i$  通常比较小, 一般都在毫米量级, 而电磁波频率通常在 GHz 段, 因此, 这里的贝塞尔调制指数  $\beta = 2kA_i < 1$ 。这时, 仅有  $m_i = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$  这几个贝塞尔边带不为 0, 且有  $J_{m_i}(\beta) \approx \beta^{m_i} / (2^{m_i} \cdot m_i!)$ 。利用贝塞尔函数对称性质, 并设  $\omega_1 / \omega_2 = a$ , (6)式可简化为

$$\text{FDPR} = \frac{|S(\omega_1)|}{|S(\omega_2)|} \approx \frac{\left| \sum_{m_1 = -3}^{+3} J_{m_1}(2kA_1) J_{-a(1+m_1)}(2kA_2) \right|}{\left| \sum_{m_1 = -3}^{+3} J_{m_1}(2kA_1) J_{-(1+am_1)}(2kA_2) \right|} \quad (7)$$

当边带  $m_i > 3$  时, 贝塞尔函数值为 0, 故分区讨论  $|a(1+m_1)|$  和  $|1+am_1|$  小于等于 3、大于 3 的情况。例如, 在  $a \in [-3, -2)$  时,

$$\begin{aligned} \text{FDPR} &= \frac{|Y(\omega_1)|}{|Y(\omega_2)|} \\ &\approx \frac{|J_{-1}(2kA_1) J_0(2kA_2) + J_0(2kA_1) J_{-a}(2kA_2)|}{|J_0(2kA_1) J_{-1}(2kA_2) + J_1(2kA_1) J_{-a-1}(2kA_2)|} \\ &= \frac{\left| -kA_1 \pm \frac{(2kA_2)^a}{2^a a!} \right|}{\left| kA_2 \pm \frac{kA_1 (2kA_2)^{a+1}}{2^{a+1} (a+1)!} \right|} \approx \frac{|-kA_1|}{|kA_2|} = \frac{|A_1|}{|A_2|} \end{aligned}$$

同理可对其它区间进行分析, 从而得到

$$\text{FDPR} = \frac{|S(\omega_1)|}{|S(\omega_2)|} \approx \frac{\left| \sum_{m_1 = -3}^{+3} J_{m_1}(2kA_1) J_{-a(1+m_1)}(2kA_2) \right|}{\left| \sum_{m_1 = -3}^{+3} J_{m_1}(2kA_1) J_{-(1+am_1)}(2kA_2) \right|} \approx \frac{|A_1|}{|A_2|} \quad (8)$$

即谐波在频域的峰值比, 近似等于目标的摄动幅度比。

对于多谐波信号(即  $N > 2$  时), 同理可得

$$\frac{|S(\omega_i)|}{|S(\omega_1)|} \approx \frac{|A_i|}{|A_1|}, \quad i \in [2, N] \quad (9)$$

即可以从回波的频谱中提取频域峰值比, 从而得出目标摄动幅度的相对关系。

#### 3.2 最大多普勒频偏与目标参数关系

为确定各摄动幅度的实际值, 得到目标摄动幅度相对关系之后, 还必须研究目标摄动幅度之间的定量关系。由式(2), 目标回波的瞬时多普勒频率为

$$f_d(t) = \frac{2}{\lambda} [A_1 \omega_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \omega_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2)] \quad (10)$$

在较长的观测时间内, 这两项中的正弦函数可能在某时刻都取最大值 1(且周期性出现), 此时最大多普勒频偏是

$$f_{d \max} = \frac{2}{\lambda} (A_1 \omega_1 + A_2 \omega_2) \quad (11)$$

对于多谐波信号, 则可由式(11)类推, 得到目标回波最大多普勒频偏

$$f_{d \max} = \frac{2}{\lambda} \sum_{i=1}^N A_i \omega_i \quad (12)$$

#### 4 目标摄动参数估计方法

根据以上分析可知,在已知 $\lambda$ 的情况下,只要测得 $\omega_i$ , $|S(\omega_i)|/|S(\omega_1)|$ 和 $f_{d\max}$ ,即可利用式(9)、式(12),联立求解 $A_i$ 。求解步骤如下:

(1)在信号频域,搜寻频谱峰值,并以峰值位置作为信号频率 $\omega_i$ 的估计值。

(2)根据谐波频域峰值比,由式(9)得到目标摄动幅度的相对关系 $A_i/A_1$ 。

(3)在信号瞬时多普勒频域,可采用包络均值等方法,得出最大多普勒频偏 $f_{d\max}$ 的估计值。

(4)根据前三步所得参数,利用式(9),式(12)联立,可求解目标的摄动幅度。

#### 5 仿真实验

下面的仿真以生命迹象探测为背景,心跳的频率范围在1~2Hz,呼吸频率范围在0.3~0.5Hz。两者的摄动幅度都在毫米量级,呼吸摄动幅度大于心跳摄动幅度,两者比值约在2~5倍。

##### 仿真1 无噪声情况

设发射1GHz的连续波,观测时间为40s。其它参数见表1。

表1 仿真1参数设置

谐波1幅度	谐波1频率	谐波2幅度	谐波2频率
1mm	1.5Hz	4mm	0.3Hz

对回波作FFT,得到其频域图形如图1所示。回波的瞬时多普勒频偏如图2所示。

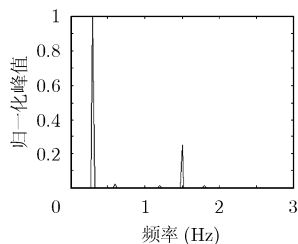


图1 理想回波频谱图

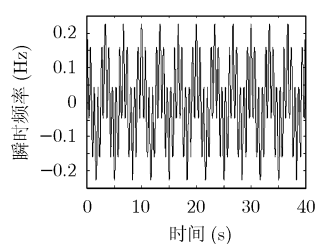


图2 瞬时频率-时间变化图

在图1中,谐波1、谐波2的频域峰值分别在在0.3Hz和1.5Hz,谐波2、谐波1的峰值比为4,即目标摄动幅度之比为4。由图2可见,最大多普勒频偏为0.2262。把这些参数代入式(12),解得谐波1的摄动幅度为1.00002mm,谐波2的摄动幅度为4.00008mm,误差为0.002%。因此,可以看出,在无噪声情况下,该方法对摄动参数的估计是有效的,且误差较小。

##### 仿真2 有噪声情况

由于噪声对最大多普勒频偏估计的影响较大,从而对摄动参数估计,尤其是摄动幅度估计带来更多的误差。

摄动参数估计误差来源于频率估计误差和摄动幅度估计误差,可定义为频率估计相对误差和摄动幅度估计相对误差的均方根值。其中,频率估计技术较为成熟,通过加窗、滤波等处理,在信噪比大于-15dB时,相对误差在 $10^{-4}$ 量级,可忽略不计;摄动幅度估计相对误差来源于频域峰值比估计误差和最大多普勒频偏估计误差,是误差的主要来源。

设发射1GHz的连续波,观测时间为40s。其它参数设置如表2所示。

表2 仿真2参数设置

谐波1幅度	谐波2幅度	谐波3幅度	谐波4幅度	谐波5幅度
1mm	2mm	3mm	4mm	5mm

频域峰值比随信噪比变化的规律如图3所示,在信噪比为-15dB~10dB时摄动幅度估计相对误差如图4所示。

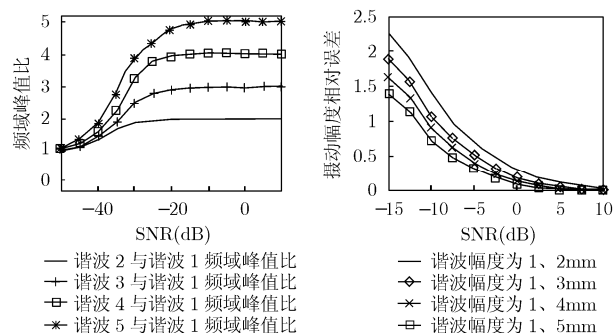


图3 频域峰值比-SNR图

图4 摄动幅度估计相对误差

由图3可见,在信噪比大于-15dB时,频域峰值比接近于摄动幅度比,估计相对误差小于20%,信噪比大于0dB时,相对误差小于5%。故在满足一定信噪比的情况下,由频域峰值比来估计摄动振幅比是有效、可行的。由图4可看出,在信噪比大于0dB时,振幅估计相对误差小于20%,信噪比大于5dB时,相对估计误差小于10%。因此,在满足一定信噪比的情况下,该目标摄动参数估计方法也有很高的估计精度。

#### 6 结束语

本文提出了基于摄动目标回波模型和参数关系的目标振动参数提取方法。仿真结果证实了方法的有效性。理想情况下,估计精度很高;但噪声对最大多普勒频偏估计的影响较大,从而导致对摄动参数的估计误差较大:当信噪比大于5dB时,对摄动参数的估计误差才能达到10%以下。该方法同样适用于多谐波情况。因此,如何在低信噪比时较精确地

估计最大多普勒频偏以提高目标摄动参数的估计精度, 有待进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] Greneker E F. Radar Sensing of Heartbeat and Respiration at a Distance with Applications of the Technology. *Radar 97*, 14 - 16 October 1997, 449: 150-154.
- [2] Geisheimer Jonathan and Greneker E F. Remote Detection of Deception Using Radar Vital Signs Monitor Technology. *Security Technology*, 2000. Proceedings. IEEE 34th Annual 2000 International Carnahan Conference: 170-173.
- [3] Geisheimer Jonathan and Greneker E F. A Non-Contact Lie Detector using Radar Vital Signs Monitor (RVSM) Technology. *IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine*, 2001: 10-14.
- [4] Chen V C. Micro-Doppler effect of micro-motion dynamics: A review. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5102: 240-249.
- [5] Bugaev A S, Chapursky V V, and Ivashov S I. Mathematical simulation of remote detection of human breathing and heartbeat by multifrequency radar on the background of local objects reflections. *Radar Conference, 2005 IEEE International 9-12 May 2005*: 359-364.
- [6] Thayanparan T, Abrol S, and Riseborough E. Micro-Doppler radar signatures for intelligent target recognition. *Defence R&D Canada-Ottawa, TECHNICAL MEMORANDUM, DRDC Ottawa TM 2004 170*, September 2004.
- [7] Proakis John G and Salehi Masoud. *Communication Systems Engineering 2nd Ed.* New Jersey: Prentice Hall, 2002: 101-102.

苏婷婷: 女, 1983 年生, 硕士生, 研究方向为信号获取与检测、数字信号处理。

孔令讲: 男, 1974 年生, 副教授, 研究方向为雷达探测与成像等。

杨建宇: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为信号检测与估计、数字信号处理、毫米波雷达成像。