

微动目标 OFDM 雷达回波调制机理分析

霍 凯,李康乐,姜卫东,黎 湘,毛钧杰

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘 要: 微动目标对雷达回波产生调制,不同的信号形式调制效应也不同.正交频分复用(OFDM)雷达信号同时具有宽带距离分辨和窄带多普勒分辨能力,能更全面深入地揭示微动的调制效应.本文在建立微动散射点目标 OFDM 雷达回波模型的基础上,从高分辨距离像和微多普勒两个方面推导了微动对 OFDM 雷达回波的调制机理,并分析了调制效应与雷达参数、微动参数之间的关系,指出 OFDM 雷达信号结合了线性调频信号与脉冲多普勒雷达信号在微动分析方面的优势,为微动特征提取与目标识别提供了更有利的条件.仿真试验和暗室测量数据分析验证了结论的合理性.

关键词: 微动; 正交频分复用; 高分辨距离像; 微多普勒; 时频变换

中图分类号: TN911.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 03-0685-05

Analysis of the Modulation Effects on OFDM Radar Echoes from Targets with Micro-Motions

HUO Kai, LI Kang-le, JIANG Wei-dong, LI Xiang, MAO Jun-jie

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Targets with micro-motions have modulation effects on radar echoes, which vary for different radar waveforms. With high range resolution and Doppler resolution simultaneity, Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) radar signals can reveal the modulation effects more completely and more profoundly. At the beginning, based on the model of OFDM radar echoes of point-scattering targets with micro-motions, the modulation mechanism is derived, at two aspects of High Resolution Range Profile (HRRP) and micro-Doppler. And then, the relationship between the modulation effects, the parameters of radar and micro-motions is analyzed. It comes to a conclusion that the OFDM radar signals combine the advantage of Linear Frequency Modulated (LFM) signals and Pulse Doppler (PD) radar signals on micro-motion analysis, and they are more favorable for micro-motion feature extraction and target recognition. Finally, the results from simulations and anechoic chamber data prove the validity of the conclusion.

Key words: micro-motion; OFDM; high resolution range profile; micro-Doppler; time-frequency transform

1 引言

雷达目标的微动特征反映了目标的电磁散射特性、几何结构和运动特征,为雷达目标特征抽取和目标识别提供了新的途径.金林^[1]教授在论述弹道导弹目标识别技术时指出了微动特性的重要性.高红卫^[2]等人在典型的微动目标建模、特征提取等方面开展了研究,但其推导和仿真均基于窄带单频信号,多为微多普勒的理论分析与仿真,没有涉及到宽带雷达信号的微动研究.张群^[3]等人提出了基于 Hough 变换等图像处理方法的微动目标宽带成像的方法,处理的对象是高分辨距离像(HRRP, high resolution range profile)序列平面,当信噪比

不高时,直线或曲线检测精度下降,成像质量将变差.

目前,微动特征分析提取与测量研究多基于常用的窄带和宽带雷达信号体制.窄带雷达信号,包括连续波和相参脉冲信号,可以从理论上揭示微动目标产生微多普勒的原理^[4,5]并可以获得较好的多普勒分辨,但无法进行距离分辨,当目标结构复杂时无法进行有效的特征提取;宽带雷达信号,如 LFM、步进频信号,可以获得较高的距离分辨,但 LFM 本身存在距离多普勒模糊,而步进频信号存在距离多普勒耦合,不利于微动特征分析提取与测量.

多载频正交频分复用(OFDM, Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)技术首先应用于通信领域.在雷达

中的应用最早由 Jankiraman 等人于 1998 年提出^[6]. Paichard 等人采用 OFDM 编码信号成功研制了名为 HY-CAM 的超宽带数字雷达^[7], 带宽达到 8GHz. Ghaleb 等人利用这部雷达的数据得到了微动目标的 ISAR 像并进行了微动特征分析^[8]. Lellouch 等人^[9]研究了 OFDM 信号在实现宽带距离分辨的同时进行多普勒处理的能力和利用脉冲串进行多普勒测量的方法. OFDM 雷达信号通过同时发射多个载频合成宽带, 实现距离高分辨, 又具备多普勒处理的条件, 因而兼备窄带和宽带微动特征提取方面的优点, 并且不存在距离多普勒耦合, 模糊函数近似理想的图钉状, 对于微动特征分析提取和测量有很大的潜在优势.

本文首先建立了微动点散射目标 OFDM 雷达回波模型, 在此基础上从窄带多普勒调制和宽带 HRRP 调制两方面揭示了微动对 OFDM 雷达回波的调制机理, 并立足于雷达参数设计分析了调制机理与雷达参数、微动参数之间的关系, 指出 OFDM 雷达信号结合了线性调频信号与单频脉冲相参雷达信号在微动分析方面的优势, 分析得出结论, 通过参数设计, OFDM 雷达信号可以同时获得两种调制特性. 最后, 通过仿真试验和暗室测量数据分析验证了结论的合理性.

2 微动目标 OFDM 雷达回波模型

设雷达发射 OFDM 多载频信号^[9]:

$$s(t) = \exp(j2\pi f_0 t) \sum_{m=0}^{M-1} u(t - mT_r) \quad (1)$$

其中, f_0 为雷达发射中心载频, M 是脉冲个数, T_r 是脉冲重复周期, $u(t)$ 为 OFDM 多载频信号的复包络:

$$u(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \omega_n \text{rect}\left[\frac{t - T_p/2}{T_p}\right] \exp(j2\pi n \Delta f t) \quad (2)$$

其中, N 是子载频个数, ω_n 是第 n 个子载频的频率加权系数, T_p 是脉冲宽度, Δf 是相邻子载频之间的频率间隔, 满足 OFDM 条件: $\Delta f = 1/T_p$, $\text{rect}(\cdot)$ 为单位矩形窗函数.

此处子载波之间的正交性是指:

$$\frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} \exp(j2\pi n \Delta f t) \exp(-j2\pi m \Delta f t) dt = \begin{cases} 1, & m = n \\ 0, & m \neq n \end{cases} \quad (3)$$

设雷达目标为一散射点目标, 以角频率为 ω_v , 幅度为 D_v , 初相为 ϕ_0 进行简谐振动, 振动中心点与雷达距离 R_0 , 振动轨迹与雷达视线夹角为 β , 如图 1 所示. 则目标相对雷达的径向运动规律 $R(t)$ 为:

$$R(t) = R_0 + D_v \cos \beta \sin(\omega_v t + \phi_0) \quad (4)$$

式(4)的径向运动模型具有一定的代表性, 几种典型的微动, 例如振动、转动、锥动都适用于这个模型^[2,4].

微动目标 OFDM 雷达回波可以表示为:

$$s_r(t) = \rho \exp[j2\pi f_0(t - \tau)] \sum_{m=0}^{M-1} u(t - mT_r - \tau) \quad (5)$$

其中, ρ 为散射中心的后向散射强度, $\tau = 2R(t)/c$.

回波与中心载频混频得:

$$s_m(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \rho \omega_n \text{rect}\left[\frac{t - mT_r - T_p/2 - \tau}{T_p}\right] \cdot \exp(-j2\pi f_0 \tau) \exp[j2\pi n \Delta f(t - mT_r - \tau)] \quad (6)$$

设采样时刻 $t = mT_r + pT_p/N$, $p = 1, 2, \dots, N-1$, 则:

$$\mathbf{R}(m, p) = R_0 + D \sin[\omega_v(mT_r + pT_p/N) + \phi_0] \quad (7)$$

其中, $D = D_v \cos \beta$. 通常情况下 $T_p \ll T_r$, 现实中大多数目标振动频率不很高, 故 $\omega_v T_p \ll 1$, 式(7)可近似为:

$$\mathbf{R}(m, p) \approx R_0 + D \sin(\omega_v m T_r + \phi_0) \quad (8)$$

不失一般性, 令 $\phi_0 = 0$, 则采样后基带回波为:

$$s_m(m, p) = \sum_{n=0}^{N-1} \rho \omega_n \exp\left(j2\pi n \Delta f \frac{p}{N} T_p\right) \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{c} (f_0 + n \Delta f) (R_0 + D \sin(\omega_v m T_r))\right] \quad (9)$$

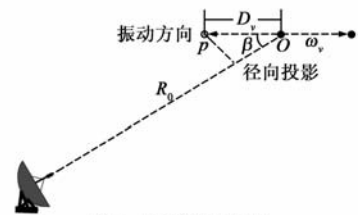


图1 目标微动场景

3 微动目标 OFDM 雷达回波调制机理分析

对式(9)参数 p 作 DFT:

$$\mathbf{Y}(m, k) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{p=0}^{N-1} \rho \omega_n \exp\left(j2\pi n \Delta f \frac{p}{N} T_p - j2\pi \frac{p}{N} k\right) \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{c} (f_0 + n \Delta f) (R_0 + D \sin(\omega_v m T_r))\right] \quad (10)$$

记

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_3(n, k) &= \sum_{p=0}^{N-1} \exp\left(j2\pi n \Delta f \frac{p}{N} T_p - j2\pi \frac{p}{N} k\right) \\ &= \frac{\sin[\pi(n \Delta f T_p - k)]}{\sin[\pi(n \Delta f T_p - k)/N]} \exp[j\pi(N-1)(n \Delta f T_p - k)/N] \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)可以看出, $|\mathbf{G}_3(n, k)|$ 在 $(n \Delta f T_p - k)/N = \pm l$ (l 为整数) 时取得峰值. 由于 $\Delta f T_p = 1$, 因此当 $n = k$ 时 $|\mathbf{G}_3(n, k)|$ 取得峰值 N , $n \neq k$ 时 $|\mathbf{G}_3(n, k)| = 0$. 由此可得:

$$\mathbf{Y}(m, k) = N \rho \omega_k \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{c} (f_0 + k \Delta f) (R_0 + D \sin(\omega_v m T_r))\right] \quad (12)$$

式(12)的物理意义是 OFDM 多载频信号的第 m 个脉冲的第 k 个子载频的频域回波, DFT 的作用实际上是从目标的多载频宽带回波中解调出每一个子载频的频域回波数据.

对于任意第 k 个子载频, $Y(m, k)$ 对应的第 k 列数据相当于发射频率为 $f_0 + k\Delta f$ 的单频正弦波雷达基带回波以 $f_s = 1/T_r$ 采样值. 令 $f_k = f_0 + k\Delta f$, 则

$$Y(m) = N\alpha\omega_k \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}f_k(R_0 + D\sin(\omega_v m T_r))\right] \quad (13)$$

记 $Y(m)$ 对应的时频分布为 $\mathbf{TF}(m, l)$, $\mathbf{TF}(m, l)$ 为 $M \times M$ 的矩阵, 则可估计微多普勒:

$$f(m) = \arg\left\{\max_{1 \leq l \leq M} \{\mathbf{TF}(m, l)\}\right\} \quad 1 \leq m \leq M \quad (14)$$

其中, $\arg\{\cdot\}$ 为取宗量运算.

对于某一个脉冲 m , $Y(m, k)$ 对应的第 m 行数据相当于这个脉冲回波的 N 个频率点的频率值, 对这 N 个频率点进行带宽合成可以获得目标的 HRRP.

消去 $Y(m, k)$ 中的频率加权系数 ω_k , $k = 0, 1, \dots, N-1$, 并对 $Y(m, k)$ 作 IDFT:

$$y(m, l) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{\omega_k} Y(m, k) \exp(j2\pi \frac{l}{N} k) \quad (15)$$

令 $t_m = 2[R_0 + D\sin(\omega_v m T_r)]/c$, 则

$$y(m, l) = \rho \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}f_0(R_0 + D\sin(\omega_v m T_r)) - j\pi(N-1)(\Delta f t_m - l/N)\right] \frac{\sin[N\pi(\Delta f t_m - l/N)]}{\sin[\pi(\Delta f t_m - l/N)]} \quad (16)$$

$y(m, l)$ 表示第 m 个脉冲的 HRRP 分布. $|y(m, l)|$ 在 $\Delta f t_m - l/N = \pm q$ (q 为整数) 时取得峰值:

$$R_0 + D\sin(\omega_v m T_r) = (\pm qN + l)\delta r \quad (17)$$

其中, $l = 1, 2, \dots, N-1$, $\delta r = c/(2N\Delta f)$.

由式(17)可以看出, 当 $D\sin(\omega_v m T_r) < \delta r$ 时, 微动对 HRRP 峰值位置没有影响, 此时微动的调制效应主要体现在相位 $\exp[-j4\pi f_0 D\sin(\omega_v m T_r)/c]$ 上; 当 $D\sin(\omega_v m T_r) \geq \delta r$ 时, HRRP 峰值位置序列将随 m 的改变而改变, 变化规律为 $R(m) = R_0 + D\sin(\omega_v m T_r)$.

综上所述, 微动目标对 OFDM 雷达回波的调制主要体现在两个方面: 在窄带多普勒调制效应方面, 微动产生时变微多普勒, 微多普勒的变化体现微动的规律; 在宽带 HRRP 调制效应方面, 调制效应与微动幅度有关: 微动径向幅度大于距离分辨单元时, HRRP 峰值位置随时间变化, 变化规律体现微动规律, 微动径向幅度小于距离分辨单元时, HRRP 峰值位置不随时间变化, 微动的调制主要体现在 HRRP 峰值的相位上.

4 调制效应与 OFDM 雷达参数、微动参数之间的关系

OFDM 雷达主要参数有中心频率 f_0 、带宽 B 、子载频频率间隔 Δf (脉宽 $T_p = 1/\Delta f$, 子载频个数 $N = B/\Delta f$)、脉冲重复频率 PRF、脉冲积累个数 M ; 微动主要

参数有径向幅度 D 、频率 f_v . 分析调制效应与各个参数之间的联系对微动特征提取以及 OFDM 微动测量雷达设计都有很重要的意义.

4.1 宽带 HRRP 调制效应与 B 、 D 的关系

宽带 HRRP 调制效应与 OFDM 雷达带宽 B 、微动径向幅度 D 关系密切. 径向幅度 D 小于距离分辨单元 δr 时, HRRP 的峰值不受微动影响, 所以 HRRP 峰值位置序列不随时间改变, 此时的微动调制效应主要体现在 HRRP 的相位上. 与窄带单频雷达相似, 抽取目标所在距离单元进行时频分析理论上可以提取微动对相位的调制规律, 但在实际处理中需事先确定微动距离单元位置, 这往往非常困难.

径向幅度 D 大于距离分辨单元 δr 时, HRRP 峰值位置序列呈现出变化, 反映出微动的规律. 径向幅度 D 所占距离分辨单元 δr 的个数越多, HRRP 峰值位置序列的变化越清晰, 微动规律刻画得越精细. 因此, 在 D 一定时, 要更好地获得微动目标宽带 HRRP 特征, 需要增大 OFDM 雷达发射信号的带宽 B . 一般情况下, 微动径向幅度 D 占据十几个到几十个距离分辨单元时适合利用宽带 HRRP 调制信息提取微动特征.

4.2 窄带多普勒调制效应与各参数的关系

窄带多普勒调制效应主要考虑两个方面的因素: 微多普勒时频分辨率与时间频率范围. 时频分辨率与时频分析工具有关, 在此不详细讨论, 时间频率范围主要与雷达采样频率、脉冲积累时间、中心频率等相关, 概括起来必须满足以下三个约束条件:

条件 1: $\max\{f_{\text{micro}D}\} \leq \text{PRF}/2$. 其中, $f_{\text{micro}D} = 4\pi f_k D f_v \cos(2\pi f_k t)/c$, $f_k = f_0 + k\Delta f \approx f_0$. 这个条件的物理意义是微动产生的微多普勒不超过时频平面的频率范围, 这样才能保证时变微多普勒正确表示在时频平面上. 由此得到, $8\pi f_0 f_v D \leq c \text{PRF}$. 若是采用二次型时频分布, 则 $\max\{f_{\text{micro}D}\} \leq \text{PRF}/4$, 即 $16\pi f_0 f_v D \leq c \text{PRF}$.

条件 2: $M/\text{PRF} \geq 1/f_v$. 其物理意义是脉冲积累时间不小于一个微动周期, 这样才能得到完整的微动规律. 由此得到, $M f_v \geq \text{PRF}$.

条件 3: $\text{PRF} \geq 2f_v$. 其物理意义是根据 Nyquist 采样定理, $Y(m)$ 的采样频率 $f_s = \text{PRF} \geq 2f_v$.

以上分析立足于已知目标先验场景设计雷达参数, 在满足各个参数约束条件下选取时频分析工具, 获得合适的时间分辨率和频率分辨率, 抑制交叉项, 以获得窄带微多普勒调制的最佳分析效果.

从本节的分析可以看出, 通过参数设计, OFDM 雷达信号可同时获得窄带和宽带的调制特性, 为微动雷达特征提取和目标识别提供了更有利的条件.

5 仿真及暗室测量数据分析

仿真参数设置: OFDM 多载频信号中心载频 $f_0 = 10\text{GHz}$, 脉冲宽度 $T_p = 1\mu\text{s}$, $\Delta f = 1\text{MHz}$, 子载频个数 $N = 512$, 合成带宽 512MHz . 子载频的频率加权系数 ω_n 选用广义余弦窗, 脉冲重复频率 $\text{PRF} = 20\text{kHz}$, 脉冲积累个数 $M = 4096$. 设置三个散射点目标, 场景如图 1 所示: 两个散射点振动中心离雷达径向距离为 $5 \times 10^4\text{m}$, 第一个径向幅度 $D_1 = 2\text{m}$, 第二个径向幅度 $D_2 = 0.2\text{m}$, 振动频率均为 10Hz , $\phi_0 = \pi/2$, 振动轨迹与雷达视线夹角为 $\beta = \pi/2$. 第三个散射点静止, 距离雷达径向距离为 $(5 \times 10^4 + 3)\text{m}$. 三个目标散射强度 ρ 均为 1.

宽带 HRRP 调制效应如图 2 所示, 振动径向幅度为 2m 的散射点 HRRP 序列明显呈现出正弦变化, 从正弦

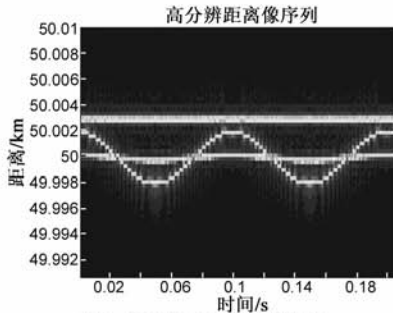


图2 宽带HRRP调制效应

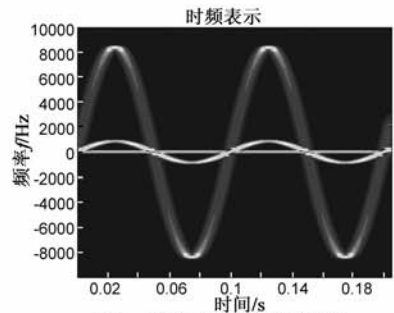


图3 窄带多普勒调制效应

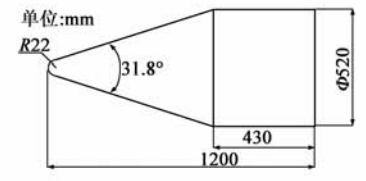


图4 目标模型尺寸示意图

下面采用模型目标暗室测量数据对上述调制效应分析进行验证, 考虑利用模型目标暗室测量宽带数据模拟 OFDM 雷达回波数据, 具体思路是: 一方面, 设置模型目标进动参数, 计算出各个采样时刻目标的姿态, 从目标全姿态暗室准静态测量数据中查表找出对应姿态的数据; 另一方面, 根据暗室测量宽带扫频间隔, 利用多个频点数据合成 OFDM 波形, 从而获得 OFDM 雷达回波.

模型为锥柱组合体, 目标全长 1200mm , 底面直径为 520mm , 尺寸示意图如图 4 所示. 暗室测量数据为宽带扫频下目标全姿态散射数据, 测量频率范围为 $8\text{GHz} \sim 12\text{GHz}$, 扫频间隔 20MHz , 目标方位角测量范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$, 测量步长 0.2° . 设定模型的进动周期为 0.1s , 进动角 10° , 雷达视线角设为 30° , 距离雷达 $5 \times 10^4\text{m}$, 由于目标旋转对称, 所以不考虑自旋, 进动近似为锥动. 根据目标锥动模型, 结合目标全姿态暗室准静态测量数据, 模拟动态目标回波序列. 设置 OFDM 雷达的中心载频 $f_0 = 10\text{GHz}$, 子载频间隔为扫频间隔, $\Delta f = 20\text{MHz}$, 子载频个数 $N = 200$, $\text{PRF} =$

变化的周期约为 0.1s 可以估计出振动频率约为 10Hz ; 振动径向幅度为 0.2m 的散射点由于幅度小于距离分辨单元, HRRP 序列近似为一条直线; 静止的散射点与振动的两个点在距离上完全分开, 并且 HRRP 序列为一条直线.

窄带多普勒调制效应如图 3 所示, 从 OFDM 信号中分离出第 512 个子载频的数据进行分析, 采用的时频分析工具为短时傅里叶变换. 静止散射点的多普勒为中间的那一条直线, 两个振动点的多普勒呈现出正弦曲线, 正弦幅度越大, 表示产生的微多普勒越大, 微动径向幅度也就越大. 从正弦曲线的周期可以看出两个振动点的频率均为 10Hz . 从图中无法获得距离信息, 所以不能进行径向距离分辨.

2kHz , 脉冲积累个数 $M = 1024$, 得到的结果如图 5、图 6 所示.

从图 5 宽带 HRRP 调制效应可以看出, 模型由一个最强散射中心 (位于第 90 个分辨单元附近)、两个稍弱

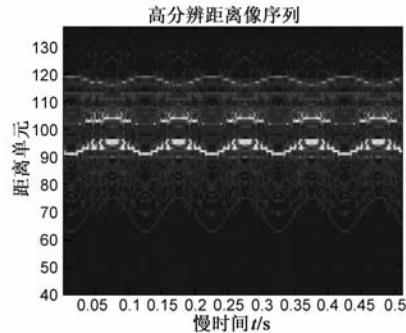


图5 宽带HRRP调制效应

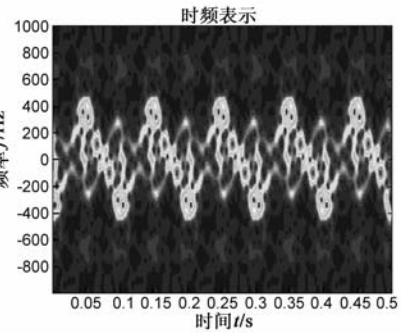


图6 窄带多普勒调制效应

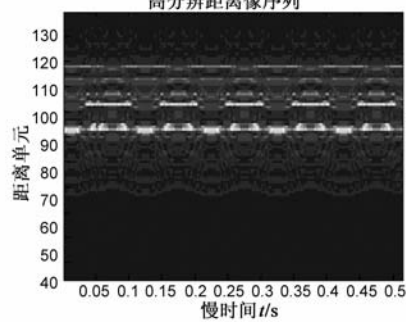


图7 宽带HRRP调制效应

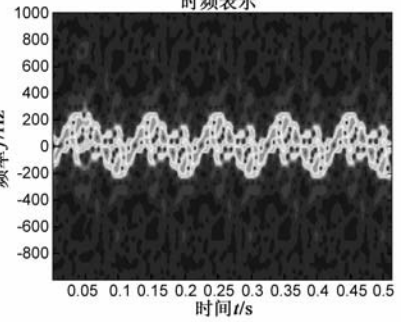


图8 窄带多普勒调制效应

散射中心(分别位于第 100、120 个分辨单元附近)和若干微弱散射中心组成,这和目标模型材质和形状相关.由于进动角度较大,散射中心径向位移占据多个距离单元,所以 HRRP 序列明显呈现出正弦变化,周期约为 0.1s. HRRP 幅度随时间变化是由目标散射强度不均匀引起的,位于第 100 个分辨单元附近的曲线断断续续,可能是由于散射中心的遮挡.

图 6 中也有一条最强的曲线,周期也约为 0.1,值得注意的是有一条稍弱的曲线与最强的曲线周期相同,但是反相,说明这两个散射中心分别位于质心的两端,进动时才会出现相位相反的多普勒,从而推断这个较弱的曲线的散射点在图 5 中对应的是位于第 120 个分辨单元附近的那个散射点,而不是位于第 100 个分辨单元附近的那个散射点.

图 7 中进动角度减小为 5° , 散射中心径向位移不再占据多个距离单元,也就不再表现出正弦曲线的变化规律,只能从图中获得较强的散射中心所在的距离单元位置,无法准确获取其微动的详细信息.但图 8 中仍然可以提取微多普勒的正弦曲线,估计其微动的周期为 0.1s. 由于进动角度变小,微多普勒减小,所以图中的正弦曲线的幅度也减小了.

6 结束语

本文从理论上推导并用实验验证了如下结论: OFDM 雷达信号结合了 LFM 信号与单频脉冲相参雷达信号在微动分析方面的优势,通过参数设计, OFDM 雷达信号可以同时获得两种调制特性,为有效地进行微动雷达特征提取和目标识别打下基础. 下一步将开展 OFDM 雷达微动特征提取方法研究.

参考文献

- [1] 金林. 弹道导弹目标识别技术[J]. 现代雷达, 2008, 30(2): 1-5.
Jin Lin. Technique of target recognition for ballistic missile[J]. Modern Radar, 2008, 30(2): 1-5. (in Chinese)
- [2] 高红卫, 谢良贵, 等. 摆动锥体目标微多普勒分析和提取[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2497-2502.
Gao Hongwei, Xie Liangui, et al. Analysis and extraction of micro-Doppler induced by cone-shaped target's wobbling[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12): 2497-2502. (in Chinese)
- [3] Zhang Qun, Yeo Tat Soon, et al. Imaging of a moving target with rotating parts based on the Hough transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 291-299.

- [4] Chen V C, Li F, et al. Micro-Doppler effect in radar-phenomenon, model and simulation study[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 2-21.
- [5] Chen V C. Doppler signatures of radar backscattering from objects with micro-motions[J]. IET Signal Process, 2008, 2(3): 291-300.
- [6] Jankiraman M, Wessels B J, van Genderen P. System design and verification of the PANDORA multifrequency radar[A]. Proceedings of International Conference on Radar Systems [C]. Brest, France: IEEE press, 1999.
- [7] Paichard Y, Castelli C J, et al. HYCAM: A RCS measurement and analysis system for time-varying targets[A]. Instrumentation and Measurement Technology Conference [C]. Sorrento, Italy: IEEE press, 2006. 921-925.
- [8] Ghaleb A, Vignaud L. Fine micro-Doppler analysis in ISAR imaging[A]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Barcelona, Spain: IEEE press, 2007. 574-577.
- [9] Lellouch G, Pribic R, van Genderen P. Wideband OFDM pulse burst and its capabilities for Doppler processing[A]. Radar 2008 International Conference [C]. Adelaide, Australia: IEEE press, 2008. 558-562.

作者简介



霍 凯 男, 1983 年 2 月出生于湖北黄冈. 2005 年获得国防科技大学通信工程专业工学学士学位, 同年开始攻读硕士学位. 2007 年提前攻读博士学位, 研究方向为雷达信号处理、雷达特征提取等.
E-mail: huokai2001@163.com

李康乐 女, 1983 年 9 月出生于安徽亳州, 讲师. 2004 年在国防科技大学获得信息工程专业工学学士, 2006 年、2010 年在国防科技大学分别获得信息与通信工程专业工学硕士和博士学位. 目前主要从事雷达目标识别、信号处理等研究工作.

E-mail: kanglelee@gmail.com

姜卫东 男, 1968 年 1 月出生于四川重庆. 研究员, 硕士生导师, 电子学会高级会员. 目前主要从事目标电磁特征信号分析、雷达目标识别及信息融合等方面的科学研究工作.

E-mail: jwd2232@vip.sina.com

黎 湘 男, 1967 年 9 月出生于湖南浏阳. 教授, 博士生导师. 已发表学术论文 40 余篇, 目前主要从事精确制导、雷达信息处理、非线性信息处理等领域的研究工作.

E-mail: lixiang01@vip.sina.com

毛钧杰 男, 1943 年 6 月出生于湖南长沙县. 教授, 博士生导师, 电子学会高级会员, 政府特殊津贴享受者, 主要从事毫米波多模复合制导与天线设计等方面的研究与教学工作.