

## 基于天底点的二相编码解调算法及实现

孙亚洲, 王国华, 朱晓菲  
(第二炮兵工程大学, 西安 710025)

**摘要:** 针对雷达高度表二相编码回波信号受多普勒和回波相位差双重调制问题,在深入分析雷达高度表回波信号模型及回波功率分布特征的基础上,提出了基于天底点的二相编码解调算法。该算法通过检测天底点回波中的多普勒和相位差信息,进行相应补偿从而实现码解调。仿真和实验表明:该算法多普勒频率检测误差小于20 Hz,相位检测误差小于 $2^\circ$ ,可有效实现码解调。

**关键词:** 雷达高度表; 二相编码; 码解调; 多普勒调制; 相位差

**中图分类号:** TN958 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)07-0098-04

## A Binary-Phase-Coded Signal Demodulation Algorithm Based on Nadir Point

SUN Ya-zhou, WANG Guo-hua, ZHU Xiao-fei  
(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** The binary-phase-coded echo signal is modulated by both Doppler and the echo phase displacement. Aiming at this problem, we analyzed the echo model and the power distribution characteristic of the echo signal of radar altimeter, and proposed a demodulation algorithm for the binary-phase-coded echo signal based on nadir point. In the algorithm, the Doppler and the phase displacement information of the nadir point echo was detected, and corresponding compensation was made to realize demodulation. Simulation and experiment results show that the maximum error of the Doppler frequency is less than 20 Hz and the maximum error of the phase is less than  $2^\circ$ . It proves that the algorithm is effective to demodulate the echo signal.

**Key words:** radar altimeter; binary phase coding; demodulation; Doppler modulation; phase difference

### 0 引言

伪随机二相编码信号具有大时宽带宽积和低截获率的特点,在雷达高度表中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。然而二相码信号属于多普勒敏感信号<sup>[2]</sup>,当雷达高度表安装在高速运动载体上时,其发射的二相码信号将会被一宽带多普勒信号调制。雷达参考晶振的相位漂移以及雷达开机时刻的不同会导致雷达接收机和发射机之间存在相位差<sup>[3]</sup>,这些都会对回波信号的码解调过程产生影响。目前研究二相编码解调方面的文章比较多<sup>[4-5]</sup>,但只考虑了多普勒对回波的影响,本文结合二相编码雷达高度表回波信号特点,综合考虑了回波多

普勒效应和相位差对码解调的影响,给出了基于天底点的码解调算法,可有效实现二相码解调。

### 1 回波多普勒及相位差对码解调影响分析

二相编码雷达高度表发射信号一般可表示为

$$s_i(t) = u(t) \exp(j2\pi f_o t) \quad (1)$$

式中: $u(t)$ 为二相编码信号; $f_o$ 为发射信号载波频率。则距离为 $R$ 的散射点回波信号 $s_r(t)$ 可表示为

$$s_r(t - \tau) = \mu(t - \tau) \exp[j2\pi(f_d + f_o)(t - \tau) + j\varphi_0] \quad (2)$$

式中: $\tau = 2R/c$ 为脉冲延时; $f_d$ 为多普勒频移; $\varphi_0$ 为接收机和发射机之间的相位差。去载波后,回波信号可表示为

$$s_r(t') = u(t') \exp(j2\pi f_d t' + j\varphi_0) \quad (3)$$

式中, $t' = t - \tau$ 。从式(3)可以看出:二相编码受多普勒和相位差双重调制,需对回波中的多普勒和相位差信息进行检测,才能实现码解调。

收稿日期:2014-07-28

修回日期:2014-09-04

作者简介:孙亚洲(1990—),男,安徽阜阳人,硕士生,研究方向为引控与突防。

## 2 雷达高度表回波特征分析

### 2.1 雷达高度表回波模型

由于地面为面目标,故可将大地回波看作照射地面区域离散运动点目标集合。根据照射地面回波延时和多普勒频率的不同,使用等距离-多普勒带对地面进行划分。距离环是脉冲在地面的照射区,因为信号收发是双程的,所以其宽度一般取发射脉冲宽度的一半;由于雷达接收机多普勒分辨率有限,一般取雷达接收机多普勒分辨率的一半作为多普勒带宽度,同一多普勒带内频率取带内多普勒频率平均值。雷达高度表发射信号不变,接收机采用正交双通道技术,则  $I$  通道和  $Q$  通道回波信号可表示为

$$I(t) = u(t - \tau_i) \sum A_i \sin[2\pi(f_o + f_{di})(t - \tau_i) + \varphi_0] \quad (4)$$

$$Q(t) = u(t - \tau_i) \sum A_i \cos[2\pi(f_o + f_{di})(t - \tau_i) + \varphi_0] \quad (5)$$

式中:  $\tau_i$  为第  $i$  个距离单元延时;  $A_i$  为第  $i$  个距离单元上的回波信号幅值;  $f_{di}$  为通过第  $i$  个距离单元的等多普勒频率;  $\varphi_0$  为相位差。不考虑延时,去载波后回波信号可表示为

$$I(t) = u(t) \sum A_i \sin(2\pi f_{di} t + \varphi_0) \quad (6)$$

$$Q(t) = u(t) \sum A_i \cos(2\pi f_{di} t + \varphi_0) \quad (7)$$

### 2.2 雷达高度表回波多普勒功率谱分析

美国 Sandia 实验室通过大量的实测证明,绝大多数地面(森林除外)在雷达高度表天线照射区域内,既有散射分量又有反射分量。散射分量分布在所有位置,反射分量则存在于垂直高度(天底点),且天底点反射分量要远大于其他分量,因此,高度表回波分量主要集中在天底点附近。

文献[6]给出了高度表回波多普勒功率谱的求法。根据文献[6]所述,雷达高度表载体高度5000 m、速度2000 m/s,天底点所在多普勒带频率为21.2 kHz,天线垂直照射地面,主瓣宽度60°情形下,回波多普勒功率谱如图1所示。

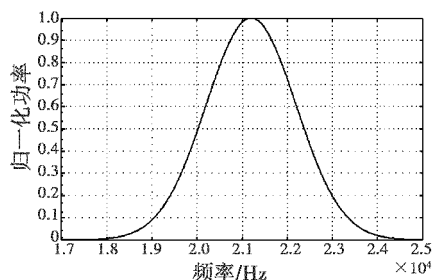


图1 回波多普勒功率谱分布

Fig. 1 Distribution of the Doppler spectrum for the echo

由图1可以看出:回波功率峰值位于天底点,回波功率3 dB 带宽为2.5 kHz,和天底点所在多普勒带宽

处于同一量级,故回波功率主要集中在天底点所在多普勒带宽内。由于地面单元非常多,而回波功率主要集中在天底点多普勒频带内,可将地面回波简化为天底点多普勒带内回波,回波模型可表示为

$$I(t) = u(t) \sin(2\pi f_d t + \varphi_0) \quad (8)$$

$$Q(t) = u(t) \cos(2\pi f_d t + \varphi_0) \quad (9)$$

为叙述方便起见,对回波幅度进行了归一化。

## 3 码解调原理

设发射信号二相编码宽度为  $t_p$ , 脉冲周期为  $t_r$ , 二相码长为  $N$ , 信号重复发射  $M$  次。雷达回波信号表示成复指数形式为

$$A(t) = Q(t) + jI(t) = u(t) \exp[j(2\pi f_d t + \varphi_0)] \quad (10)$$

将回波信号以  $t_p$  为间隔进行采样,并提取相同距离单元的  $M$  个数据,共有  $N$  组,可写为矩阵

$$A_{mn} = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & \cdots & a_{0n} \\ a_{10} & a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m0} & a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (11)$$

矩阵  $k$  列  $l$  行可表示为<sup>[7-8]</sup>

$$a_{kl} = u(lt_p) \exp[j2\pi f_d (kT_1 + lt_p) + j\varphi_0] \quad (12)$$

对第  $l$  列进行  $M$  点 FFT 变换可得

$$b_l(m) = \sum_{k=0}^{M-1} a_{kl} e^{-j\frac{2\pi}{M}mk} \quad (13)$$

式中:  $b_l(m)$  表示 FFT 结果;  $m$  表示 FFT 后的频率通道号;  $m$  取 0 到  $M-1$  的整数。由于 FFT 中频率为离散的,则多普勒频率可表示为<sup>[2]</sup>

$$f_d = \frac{a}{T_1} + \frac{b}{T_2} = \frac{a}{T_1} + \frac{b}{MT_1} \quad (14)$$

式中:  $T_1 = Nt_r$ ;  $T_2 = MT_1$ ; 第一部分表示快时间变化引起的脉内多普勒频移;第二部分表示慢时间变化引起的脉间多普勒频移。将式(14)代入式(12)可得

$$a_{kl} = u(lt_p) \exp(j\varphi_0) \exp[j2\pi(\frac{a}{T_1} + \frac{b}{MT_1})(kT_1 + lt_p)] = u(lt_p) \exp(j\varphi_0) \exp(j2\pi \frac{kb}{M}) \exp(j2\pi f_d lt_p) \quad (15)$$

将式(15)代入 FFT 中得

$$b_l(m) = u(lt_p) \exp(j\varphi_0) \exp(j2\pi f_d lt_p) \sum_{k=0}^{M-1} \exp(-j2\pi \cdot \frac{k(m-b)}{M}) = \begin{cases} 0 & m \neq b \\ Mu(lt_p) \exp(j\varphi_0) \exp(j2\pi f_d lt_p) & m = b \end{cases} \quad (16)$$

由于地面回波为面目标回波,当  $m \neq b$  时并不为零,但天底点回波多普勒频率所对应幅值一定最大,通过检测 FFT 输出峰值即可得到  $b$  值。由于  $b$  已知,可

先对脉间多普勒频移进行补偿,补偿后输出序列为

$$b'_i(m) = b_i(m) \exp\left(-j2\pi \frac{kb}{MT_1} lt_p\right) = Mu(lt_p) \exp(j\varphi_0) \exp\left(j2\pi \frac{al}{N}\right) \quad (17)$$

式中,  $l$  表示同一脉内不同距离单元,  $l$  取 0 到  $N-1$  的整数。

当  $l=0$  时,由式(12)可得

$$a_{k0} = u(0) \exp\left[j\left(2\pi \frac{kb}{M} + \varphi_0\right)\right] \quad (18)$$

对应的  $Q$  通道信号为

$$Q(k) = u(0) \cos\left(2\pi \frac{kb}{M} + \varphi_0\right) \quad (19)$$

对序列  $Q(k)$  进行预处理后进行 apFFT<sup>[9-10]</sup> (全相位傅里叶变换)可求得相位差  $\varphi_0$ 。由于  $\varphi_0$  已知,对序列  $b_i(m)$  进行相位补偿可得

$$b'_i(m) = b_i(m) e^{-j\varphi_0} = Mu(lt_p) \exp\left(j2\pi \frac{al}{N}\right) \quad (20)$$

对脉间多普勒频移补偿结束后,再对脉内多普勒频移进行补偿。对式(20)做  $N$  点 FFT 得

$$\psi(k) = \sum_{l=0}^{N-1} Mu(lt_p) \exp\left(j2\pi \frac{al}{N}\right) \exp\left(-j2\pi \frac{kl}{N}\right) = \sum_{l=0}^{N-1} Mu(lt_p) \exp\left(-j2\pi \frac{l(k-a)}{N}\right) \quad (21)$$

当  $a=0$ ,即无多普勒模糊时

$$\psi_0(k) = \sum_{l=0}^{N-1} Mu(lt_p) \exp\left(-j2\pi \frac{kl}{N}\right) \quad (22)$$

比较两式可以得出

$$\psi(k) = \psi_0(k-a) \quad (23)$$

将 FFT 结果循环移位后进行匹配滤波,通过比较匹配结果值好坏,确定最佳循环移位数即  $a$  值。有了  $a$  值,对  $b'_i(m)$  进行脉内补偿,可得最终补偿序列  $b_i$  为

$$b_i = b'_i(m) \exp\left(-j2\pi \frac{al}{N}\right) = Mu(lt_p) \quad (24)$$

由上式可看出序列  $b_i$  和初始编码只有幅度上的不同,幅度归一化后即和初始编码一致。

## 4 算法性能仿真分析

### 4.1 码解调效果仿真

设单个脉冲编码宽度为  $0.2 \mu\text{s}$ ,单个脉冲周期为  $2 \mu\text{s}$ ,编码长度为 63 位,信号重复发射 20 次。设回波信号  $A(t) = u(t) \sum_{i=1}^3 A_i \exp[j(2\pi f_{di}t + \varphi_0)]$ ,  $f_{di}$  分别为 21.2 kHz, 19.2 kHz, 17.2 kHz,  $A_i$  分别为 10, 3, 1,  $\varphi_0 = \pi$ ,天底点所在多普勒带频率为 21.2 kHz。仿真结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出,回波信号由于受多普勒调制影响,其幅值逐渐减小,同时受相位差影响,回波编码和

初始编码相位相差  $\pi$ ,初始编码为“1”时,回波编码为“-1”。解码信号由于进行了多普勒和相位差补偿,和初始编码一致。由此可以看出,该算法进行码解调的关键在于正确检测回波中的多普勒和相位差信息。

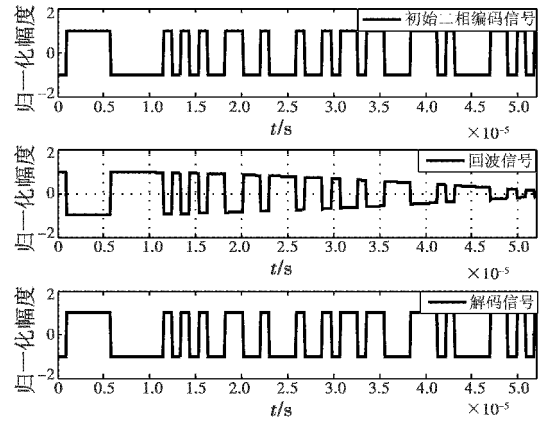


图 2 初始编码信号和解码信号对比图

Fig. 2 Initial coded signal and decoded signal

### 4.2 多普勒检测效果仿真

使用 Matlab 软件产生 30 个区间为 21 kHz 到 22 kHz 的随机数,按照从小到大排列依次作为天底点多普勒频率值,其他仿真条件不变,天底点多普勒检测误差曲线如图 3a 所示。设回波只包含天底点多普勒频率,其他仿真条件不变,天底点多普勒检测误差曲线如图 3b 所示。

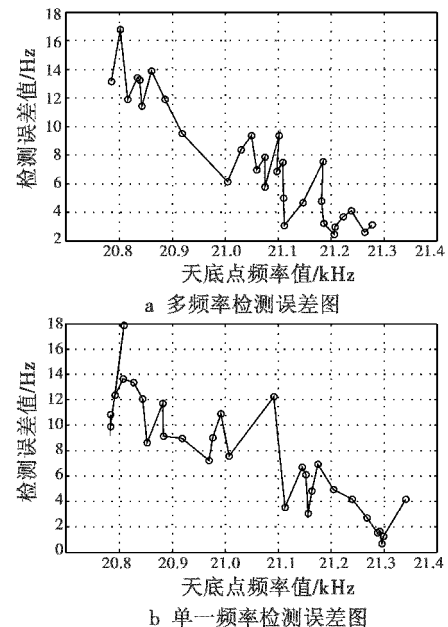


图 3 天底点多普勒频率检测误差图

Fig. 3 The Doppler detection error

由图 3 可以看出,多普勒频率检测误差均小于 20 Hz,可见回波中其他多普勒分量对天底点多普勒频率的检测影响较小,间宽度  $t = 2 \times 10^{-6} \times 63 \text{ s} = 0.000126 \text{ s}$ ,因多普勒检测误差对编码信号造成的最大相位偏移为

$t \times 20 \times 360^\circ = 0.9^\circ$ , 由此可看出多普勒检测误差对解码产生的影响也较小。

### 4.3 相位差检测效果仿真

使用 Matlab 软件产生 30 个区间为  $0 \sim 2\pi$  的随机数作为相位  $\varphi_0$ , 其他仿真条件不变, 相位检测误差曲线如图 4a 所示。设回波只包含天底点多普勒频率, 其他仿真条件不变, 相位检测误差曲线如图 4b 所示。对比图 4a 和图 4b 可以看出, 当回波中只包含单个频率时, 相位检测误差接近于  $0^\circ$ , 当回波中包含多个多普勒频率分量时, 最大检测误差接近  $2^\circ$ , 由于回波中包含多个多普勒频率, 误差曲线也变得分散, 这是由于相位信息非常敏感, 受杂波影响较大, 在信噪比较低情况下相位信息很容易被杂波淹没, 导致无法检测。

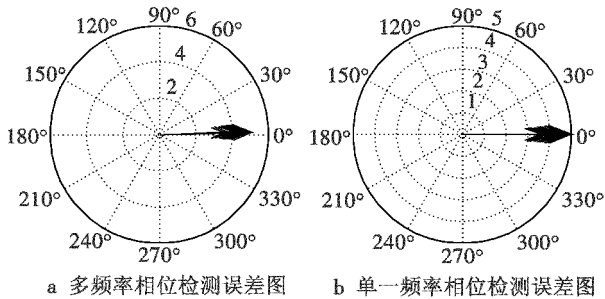
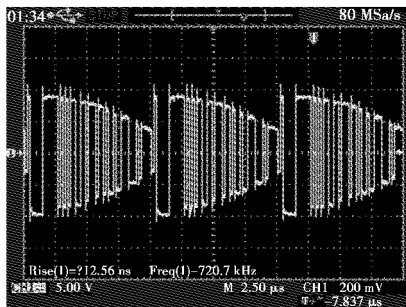


图 4 相位检测误差图  
Fig. 4 Error of the phase detection

### 5 算法的硬件实现

使用北京威视锐科技公司的 FPGA 开发板, 设计了基于该算法的回波信号处理器, 并搭建实验系统验证了该算法的有效性。系统主要由 4 部分组成, 其中, 回波信号模拟部分由惠普公司的任意波形发生器 AWG7122C 完成, AD 采样部分使用德州仪器公司的 TLC5540, FPGA 主要完成算法的实现及同步时序控制部分, 显示部分由示波器完成。实验测试条件与 4.1 节相同, 实验结果如图 5 所示。可以看出实验结果如图 2 仿真结果一致, 能够有效进行码解调, 证明该算法切实可行。



a 补偿前回波序列

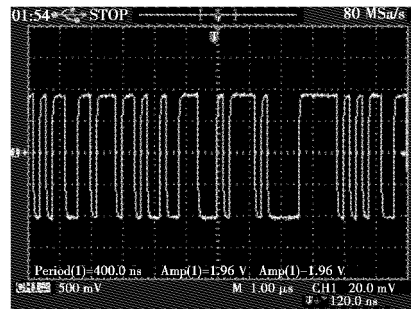


图 5 补偿前后回波序列对比图  
Fig. 5 The echo sequence before and after compensation

### 6 结束语

通过对全相参体制二相编码雷达高度表回波特性的研究, 建立了基于天底点的回波模型, 得出回波编码受多普勒频移和相位差产生的相移的双重调制, 提出了基于天底点的码解调算法, 通过检测回波中多普勒和相位信息, 进行相应补偿从而得到正确编码。

仿真结果表明解码关键在于多普勒和相位差的检测, 其中, 相位差对回波编码的产生的相移影响要大于多普勒频移, 并且相位信息对杂波更为敏感, 在较低信噪比情况下, 更不容易检测。实验结果表明该算法能够有效进行码解调, 实时性强, 具有一定的工程应用价值。

### 参考文献

- [1] 王毅鹰, 苏兮. 基于 m 序列信号的多普勒补偿方法[J]. 现代雷达, 2007, 29(2): 48-51. (WANG Y Y, SU X. Doppler compensation method based on m-sequence signal[J]. Modern Radar, 2007, 29(2): 48-51.)
- [2] 刘建新. 脉冲及脉间二相编码雷达高度表信号处理方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2004. (LIU J X. On signal processing algorithms for pulse & inter-pulse binary phase coded radar altimeter[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2004.)
- [3] 唐高弟. 相参体制雷达高度表回波信号模拟性能分析[C]// 2001 年全国微波毫米波会议论文集, 成都: 中国电子学会, 2001: 600-602. (TANG G D. Coherent radar altimeter echo simulator performance analysis[C]// Microwave and Millimetre-wave Symposium of China, Chengdu: Chinese Institute of Electronics, 2001: 600-602.)
- [4] 田孝斌. 二相编码信号的多普勒特性及其补偿算法研究[J]. 电子科技, 2013, 26(9): 31-33. (TIAN X B. Research on Doppler characteristics and a compensation method for biphas coded signal[J]. Electronic Science and Technology, 2013, 26(9): 31-33.)
- [5] 王松, 葛海波. 基于全相位 FFT 的伪码捕获研究[J]. 计

(下转第 110 页)

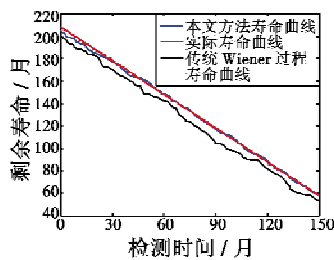


图4 剩余寿命预测曲线

Fig. 4 Prediction curve of remaining useful life

## 6 结束语

传统的基于 Wiener 过程的寿命预测方法不考虑漂移系数和扩散系数在退化过程中的变化,与实际情况不相符。本文建立了以漂移系数与性能退化量为状态参数和观测值的状态空间方程,通过 Kalman 滤波和 EM 算法实现了漂移系数与剩余寿命概率密度函数的实时更新。最后采用本文所提方法对某陀螺仪进行寿命预测,结果表明寿命预测曲线能够很好地跟踪实际寿命曲线,从而验证了方法的有效性。

## 参考文献

- [1] PECHT M. Prognostics and health management of electronics[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- [2] LU J C, MEEKER W. Using degradation measures to estimate a time-to-failure distribution [J]. Technometrics, 1993, 35(2):161-174.
- [3] BLOCH-MERCIER S. A preventive maintenance policy with sequential checking procedure for a Markov deteriorating system[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 142(3):548-576.
- [4] GEBRAEEL N, LAWLEY M, LI R, et al. Residual-life distributions from component degradation signals; a Bayesian

approach[J]. IIE Transactions, 2005, 37(6):543-557.

- [5] DELIA M C, RAFAEL P O. A maintenance model with failures and inspection following Markovian arrival processes and two repair modes [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 186(2):694-707.
- [6] WANG X. Wiener processes with random effects for degradation data [J]. Journal of Multivariate Analysis, 2010, 101(2):340-351.
- [7] BARKER C T, NEWBY M J. Optimal non-periodic inspection for a multivariate degradation model [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(1):33-43.
- [8] 苏成利,王树青.一种基于 Wiener 模型的非线性预测控制算法[J].信息与控制,2007,36(1):86-92. (SU C L, WANG S Q. A nonlinear prognostic control algorithm based on Wiener model [J]. Information and Control, 2007, 36(1):86-92.)
- [9] 彭宝华,周经伦,孙权,等.基于退化与寿命数据融合的产品剩余寿命预测[J].系统工程与电子技术,2011,33(5):1073-1078. (PENG B H, ZHOU J L, SUN Q, et al. Remaining useful life prediction based degradation and life data [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(5):1073-1078.)
- [10] 王兆强,胡昌华,司小胜,等.一种基于维纳过程和贝叶斯估计的独立部件剩余寿命实时预测方法[C]//第25届中国控制与决策会议,贵阳,2013:4 808-4812. (WANG Z Q, HU C H, SI X S, et al. A new remaining useful life prediction approach for independent component based on the Wiener process and Bayesian estimating paradigm [C]//The 25th Chinese Control and Decision Conference, Guiyang, 2013:4808-4812.)
- [11] SI X S, WANG W, HU C H, et al. A Wiener-process-based degradation model with a recursive filter algorithm for remaining useful life estimation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 35(1):219-237.

(上接第101页)

- 计算机工程与技术,2012,33(10):3708-3714. (WANG S, GE H B. PN code acquisition based on apFFT [J]. Computer Engineering and Design Electronics, 2012, 33(10):3708-3714.)
- [6] 张海,陈惠连,彭定之,等.天线主瓣照射圆内的多普勒分布[J].系统工程与电子技术,2001,16(1):113-116. (ZHANG H, CHEN H L, PENG D Z, et al. Doppler spectrum from the ground circle radiated by antenna main-lobe[J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 16(1):113-116.)
- [7] 田黎育,高梅国.一种二相码信号多普勒补偿方法的研究与实现[J].北京理工大学学报,2002,22(6):757-760. (TIAN L Y, GAO M G. A Doppler compensation method for bi-phase coded signals [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 22(6):757-760.)

- [8] 刘建新,陈惠连,向敬成,等.脉间二相编码脉冲信号的多普勒处理[J].信号处理,2003,19(2):132-134. (LIU J X, CHEN H L, XIANG J C, et al. Doppler processing for pulse to pulse bi-phase-coded pulse [J]. Signal Processing, 2003, 19(2):132-134.)
- [9] 王兆华,黄翔东,杨尉.全相位 FFT 相位测量法[J].世界科技研究与发展,2007,29(4):28-32. (WANG Z H, HUANG X D, YANG W. The measuring phase method of all-phase FFT [J]. World Sci-tech R & D, 2007, 29(4):28-32.)
- [10] 王兆华,黄翔东.基于全相位谱分析的相位测量原理及应用[J].数据采集与处理,2009,24(6):777-782. (WANG Z H, HUANG X D. Principle of phase measurement and its application based on all-phase spectral analysis [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009, 24(6):777-782.)