

# A Composite Velocity Measurement Method Based on Chirp-Step

Chen Wang, Yun Fu, Xuting Zhou

School of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu Anhui  
Email: 308057251@qq.com

Received: Jul. 24<sup>th</sup>, 2016; accepted: Aug. 11<sup>th</sup>, 2016; published: Aug. 17<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Millimeter wave (MMW) Chirp-Step Costas coded radar is a high-resolution distance radar, and motion compensation has to be implemented to improve resolution of moving target. This paper adopts an approach for motion compensation based on Pulse-Doppler velocity, and analyzes the effect of compensation for high velocity target with diversified velocity. The simulation result confirms effective and fast effect of the technology. High resolution 1-D range profile is generated by using the algorithm.

## Keywords

MMW Radar, Composite Speed, Chirp-Step, Costas Code, Pulse-Doppler

---

# 一种基于Chirp-Step的复合测速方法

王 宸, 傅 赟, 周旭廷

安徽师范大学物理与电子信息学院, 安徽 芜湖  
Email: 308057251@qq.com

收稿日期: 2016年7月24日; 录用日期: 2016年8月11日; 发布日期: 2016年8月17日

---

## 摘 要

毫米波Costas调频步进(Chirp-Step)编码雷达是一种距离高分辨率雷达, 实现运动目标的距离高分辨必

须进行运动补偿。本文采用脉冲多普勒测速的运动补偿方法，并对其在不同速度下，对高速运动目标的补偿进行了仿真分析。结果表明该方法补偿精度高，运算速度快。用该方法速度补偿后，可以得到运动目标的高分辨一维距离像。

## 关键词

毫米波雷达，复合测速，调频步进，Costas编码，脉冲多普勒

## 1. 引言

提高距离分辨率是现代雷达应用的一个重要研究方向。由于雷达的距离分辨率与信号带宽成反比,所以为获得高分辨率的距离像必须采用大带宽信号。频率步进信号通过发射一串频率跳变的脉冲信号,能够在降低信号处理瞬时带宽的条件下实现距离高分辨,因而近年来得到了较深入的研究[1],但是对速度及其敏感,容易产生速度模糊,不利于对目标的测速、测距,为了提高分辨率,文献[2]提出了正负调频测速法,该方法要求目标合成距离像不能存在距离模糊,对系统参数要求较高;文献[3]提出波形熵法获得一维距离像,但是当脉冲个数较少且脉冲重复频率较大时,离像峰值的发散和衰减很不明显,补偿后每幅距离像的波形熵相差不大,不能清晰地出现全局最小值,此时最小波形熵法不再适用。与前述相比, Costas频率编码信号[2]具有近似理想的“图钉”形模糊函数,消除了距离-多普勒耦合,但由于目标运动产生的多普勒失配引起能量发散,为了使聚焦理想,必须进行运动补偿。

因此,一种新的方法,基于脉冲多普勒测速的方法被提出[4][5],这种方法首先用相邻的两帧脉冲信号实现脉冲多普勒测速,用已知速度对目标一维距离像补偿,由于回波没用峰值走动,只是能量发散,所以补偿后可以使目标能量集中,从而生成高分辨一维距离像。该方法计算量减小,易于实现。本文首先分析了毫米波Costas编码雷达的原理和多普勒性能,在此基础上采用脉冲多普勒测速的方法进行运动补偿,并给出仿真结果。

## 2. 目标运动对 Costas 编码雷达的影响

### 2.1. 信号形式及基本处理

毫米波Costas编码雷达的发射信号是一帧载频Costas编码的相参脉冲序列,设调频步进信号的脉冲个数为 $N$ ,脉冲宽度为 $T_p$ ,脉冲重复周期为 $T_r$ ,频率进步量为 $\Delta f$ ,第一个子脉冲的中心载频为 $f_0$ ,则雷达发射的脉冲序列的数学表达式为[6]-[8]:

$$s_i(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{T_p}} \text{rect}\left(\frac{t - iT_r}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_i t) \quad (1)$$

式中:  $f_i = f_0 + (c_i - 1)\Delta f$ ,  $c_i$ 为Costas序列。

对于距离为 $R_m$ 的目标,假设有 $M$ 个散射点,用与发射脉冲信号载频相同的相参本振进行混频,经过I/Q正交及归一化处理,可得目标回波的复包络输出为[9]-[11]:

$$x_i(t) = \sum_{m=1}^M B_m \text{rect}\left(\frac{t - iT_r - \tau(t)}{T_p}\right) \exp(-j2\pi f_i \tau(t)) \quad (2)$$

式中:  $\tau(t) = \frac{2(R_m - vt)}{C + v} \approx \frac{2(R_m - vt)}{C}$  为目标回波时延;这里 $R_m$ 是第 $m$ 个散射点到雷达的初始距离,

$m = 1, 2, \dots, M$ ;  $v$  为目标的径向速度;  $C$  为光速;  $B_m$  为第  $m$  个散射点回波的幅值。

把  $\tau(t)$  代入式(2), 取样得:

$$x'_i(t_s) = \sum_{m=1}^M B_m \exp(j\varphi'_m(i)) \quad (3)$$

其中  $\varphi'_m(i) = -2\pi f_i 2(R_m - v(iT_r + t_s))/C$ , 这里  $t_s$  是采样时间,  $iT_r + \tau_n < t_s < iT_r + T_p + \tau_n$ ,  $\tau_n$  是第  $n$  个散射中心到雷达的时延。上述数学表达式可以作类似的理解: 一组等间隔的频率谱线, 经过 Costas 编码后, 向线性目标系统发射, 对目标进行激励, 其回波是对目标系统的频域采样, 对得到的频域信息调序后进行 IFFT, 就可以得到相应的时域信息。即目标一维距离像, 当目标有速度时, 发生多普勒频移, 则目标系统为一个非线性系统, 必须进行补偿后才能处理。当步进频率信号经过 Costas 编码调制时, 信号的顺序被打乱, 必须将  $x_i(t_s)$  按频率步进方式整序才能进行 IFFT。

## 2.2. 多普勒效应

Costas 编码消除了距离 - 多普勒耦合, 消除了目标一维距离像的峰值走动, 但是经过编码之后, 相当于在各步进信号之间引入了随机变量, 所以引起目标一维距离像能量发散, 为了使聚焦理想, 必须进行运动补偿。

对于以速度  $v$  运动的目标, 令  $\varphi'_m(i) = -2\pi(\theta'_i + \theta'_{vi})$ , 这里,  $\theta'_i$  和  $\theta'_{vi}$  分别是与速度无关的项和与速度有关的项, 它们表示为:

$$\theta'_i = \frac{2f_i R_m}{C} \quad (4)$$

$$\theta'_{vi} = -\frac{2f_i v(t_s + iT_r)}{C} \quad (5)$$

$\theta'_i$  是静止时的正常相位关系,  $\theta'_{vi}$  是速度引起的相移。

## 3. 基于多普勒测速的运动补偿

### 3.1. 多普勒测速方法

相邻的两帧 Costas 编码脉冲回波, 第一帧和第二帧之间相同载频的脉冲相差时间为  $NT_r$ 。则第一帧的信号回波如式(3)所示, 对第二帧脉冲回波, 在  $iT_r + t_s + NT_r$  时刻采样, 可得到:

$$x''_i(t_s) = \sum_{m=1}^M B_m \exp(j\varphi''_m(i)) \quad (6)$$

式中,  $\varphi''_m(i) = -2\pi(\theta''_i + \theta''_{vi})$ ,  $\theta''_i = \frac{2f_i R}{C}$ ,  $\theta''_{vi} = -\frac{2f_i v(t_s + iT_r + NT_r)}{C}$ 。

Costas 编码雷达不存在距离 - 多普勒耦合造成的峰值走动, 所以每一个散射中心不会移动到别的距离单元。由式(3)和式(6), 我们可得到如下表达式:

$$x(i)_v = \frac{x''_i(t_s)}{x'_i(t_s)} = \exp(j\varphi(i)) \quad (7)$$

式中  $\varphi(i) = -2\pi(\varphi''_m - \varphi'_m) = 4\pi f_i v NT_r$ , 所以

$$x(i)_v = \exp\left(j \frac{4\pi f_i v NT_r}{C}\right) = \exp\left(j \frac{4\pi f_0 v NT_r}{C}\right) \exp\left(j \frac{4\pi \Delta f v NT_r}{C}\right) \quad (8)$$

对式(8)作 FFT, 可得

$$y(k) = B \sum_{i=0}^{N-1} \exp\left(j \frac{4\pi i \Delta f v N T_r}{C}\right) \cdot \exp\left(-j 2\pi i \frac{k}{N}\right) \quad (9)$$

式中  $B = \exp\left(-j \frac{4\pi f_0 v N T_r}{C}\right)$ , 所以

$$|y(k)| = B \frac{\left| \sin\left(\pi \left(\frac{2N\Delta f v N T_r}{C} - k\right)\right) \right|}{\left| \sin\left(\pi \left(\frac{2\Delta f v N T_r}{C} - \frac{k}{N}\right)\right) \right|} \quad (10)$$

当  $k = \frac{2N\Delta f N T_r v}{C}$  时,  $|y(k)|$  有最大值, 所以目标速度为:

$$v = \frac{kC}{2N\Delta f N T_r} \quad (11)$$

由式(11)得到的速度对式(3)作速度补偿, 然后在作 FFT, 可得到高分辨的一维距离像。

### 3.2. 仿真

为考察脉冲多普勒测速法速度补偿的性能, 本文用如下参数进行仿真: 目标有 2 个强散射点,  $R_m = [340 \text{ m } 344 \text{ m } 350]$ ,  $f_0 = 94 \text{ GHz}$ ,  $\Delta f = 10 \text{ MHz}$ ,  $T_r = 40 \text{ us}$ ,  $T_p = 100 \text{ ns}$ ,  $N = 64$ 。仿真速度设置为  $[-110 \text{ m/s}, 110 \text{ m/s}]$ 。

从以上图中可以看出, 对于 Costas 编码步进频信号, 运动目标回波本身不存在峰值走动, 但是能量发散严重, 当速度大于  $2.5 \text{ m/s}$  时, 峰值较小的散射点几乎淹没, 用脉冲多普勒测速法速度补偿是对目标回波进行聚焦。图 1 分别是速度为  $0$ 、 $2.5 \text{ m/s}$ 、 $v = 110 \text{ m/s}$  时, 目标的一维距离像, 由图 1 看出, 在速度为  $10 \text{ m/s}$  时, 由于能量发散, 目标一维距离像已经完全找不到目标的位置, 图 2 是经过速度补偿后的一维距离像, 它们补偿前的速度分别是  $2.5 \text{ m/s}$ 、 $50 \text{ m/s}$  和  $110 \text{ m/s}$ 。补偿后, 能量被集中, 从而生成目标的高分辨一维距离像, 可以进行精确的测距、目标识别等处理。由于 Costas 编码信号的回波没用峰值走动, 只需要使用本方法集中信号的能量, 即使有测速误差, 只要能量的集中能找到峰值点, 就能正确测出举例。因此用脉冲多普勒测速方法进行速度补偿, 适合 Costas 编码雷达的运动补偿处理。

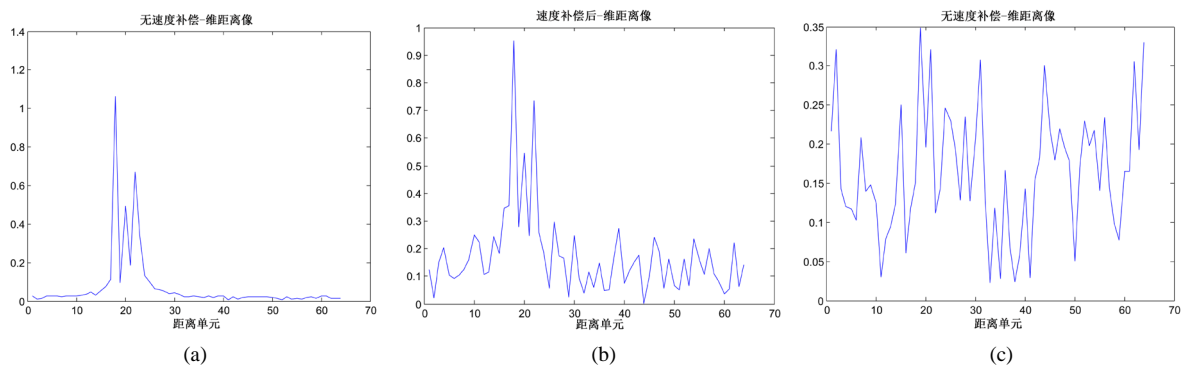


Figure 1. Range image of target before speed compensation. (a)  $v = 0 \text{ m/s}$ ; (b)  $v = 2.5 \text{ m/s}$ ; (c)  $v = 110 \text{ m/s}$

图 1. 速度补偿前目标一维距离像。(a)  $v = 0 \text{ m/s}$ ; (b)  $v = 2.5 \text{ m/s}$ ; (c)  $v = 110 \text{ m/s}$

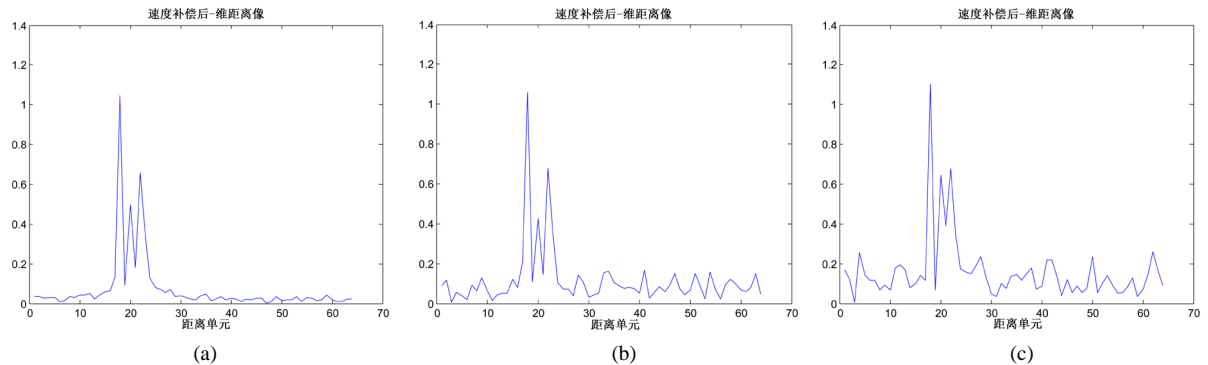


Figure 2. Range image of the target after speed compensation. (a)  $v = 2.5$  m/s; (b)  $v = 10$  m/s; (c)  $v = 110$  m/s

图 2. 速度补偿后目标一维距离像。(a)  $v = 2.5$  m/s; (b)  $v = 10$  m/s; (c)  $v = 110$  m/s

#### 4. 结束语

本文运用脉冲多普勒测速的运动补偿方法对毫米波 Costas 编码动目标一维距离像进行运动补偿, 仿真结果表明该方法速度快、补偿效果好, 经过补偿后的目标一维距离像, 可以进行精确的测距及目标识别。

#### 参考文献 (References)

- [1] 孙慧霞, 刘峥. 毫米波调频步进雷达复合测速方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(3): 539-543.
- [2] 刘峥, 刘宏伟. 正负步进频率编码信号及其处理[J]. 信号处理, 1999(S1): 21-25.
- [3] 刘静, 李兴国, 吴文. 波形熵法在毫米波 Costas 跳频雷达运动补偿中的应用[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(4): 303-306.
- [4] 刘静, 李兴国, 吴文. 毫米波 Costas 编码雷达动目标一维距离像运动补偿[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(5): 344-347.
- [5] 魏玺章, 刘振, 邓斌, 黎湘. Costas 编码跳频宽带雷达信号测速技术研究[J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2426-2429.
- [6] 王桂丽, 李兴国. 频率步进和脉冲多普勒复合测速研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(3): 190-192.
- [7] Orlenko, V.M. (2004) Simulation of Target Detection Using a High Range Resolution Radar. *Ultras Ultrash Impulse Signal*, 9, 19-22. <http://dx.doi.org/10.1109/uwbus.2004.1388068>
- [8] De Maio, A., Farina, A. and Gerlach, K. (2007) Adaptive Detection of Range Spread Targets with Orthogonal Rejection. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 43, 738-751. <http://dx.doi.org/10.1109/TAES.2007.4285365>
- [9] Jia, S.G. and Kong, L.J. (2009) A New Approach to Range Spread Target Detection Based on Information Entropy. *2009 2nd Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, Xi'an, 26-30 October 2009, 560-562. <http://dx.doi.org/10.1109/APSAR.2009.5374222>
- [10] Farina, A. and Studer, F.A. (1991) Detection with High Resolution Radar: Great Promise, Big Challenge. *Microwave Journal*, 24, 263-273.
- [11] 孙慧霞, 刘峥. 毫米波调频步进雷达复合测速方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(3): 539-543.

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>