

文章编号: 1001-9014(2005)05-0344-04

# 毫米波 Costas 编码雷达动目标一维距离像运动补偿

刘 静, 李兴国, 李跃华

(南京理工大学, 江苏 南京 210094)

**摘要:**毫米波 Costas 编码雷达是一种高距离分辨率雷达, 运动补偿是其实现距离高分辨率的核心技术. 提出了一种基于时域的运动补偿方法, 并对其测速精度进行了分析. 仿真结果表明该方法是可行的, 具有速度快的优点.

**关键词:**高分辨率雷达; 运动补偿; 一维距离像; Costas 编码

**中图分类号:** TN957; TN958 **文献标识码:** A

## MOTION COMPENSATION FOR 1-D RANGE PROFILE OF MOVING TARGET IN MMW COSTAS FREQUENCY HOPPED RADAR

LIU Jing, LI Xing-Guo, LI Yue-Hua

(Nanjing Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210094, China)

**Abstract:** MMW Costas frequency-coded radar is a kind of high-range-resolution radar, and motion compensation is the key to realize high range resolution. A motion compensation method based on time domain was proposed, and the accuracy of estimating velocity was also analyzed. Simulations show that this method is feasible and fast.

**Key words:** high resolution radar; motion compensation; 1-D range profile; Costas code

### 引言

高分辨率雷达是现代雷达的一个重要发展方向<sup>[1,2]</sup>, 它要求雷达系统具有大的带宽. 在现有的硬件水平限制下, 频率编码波形可以避免某些高分辨率波形应用时的实际问题, 在保证高分辨率的前提下, 具有较窄的瞬时带宽, 显著降低了对接收机和信号处理器件的要求, 易于工程实现, 是一种实用的高分辨率信号形式. 与频率步进信号相比, Costas 频率编码信号具有近似理想的“图钉”型模糊函数, 消除了距离—多普勒耦合, 且距离旁瓣被控制在较低电平, 但由于目标运动产生的多普勒失配会引起能量发散, 为了使聚焦理想, 必须进行运动补偿. 本文首先分析了毫米波 Costas 编码雷达的原理和多普勒性能, 在此基础上提出了一种基于时域的运动参数估计方法, 最后给出了仿真结果.

### 1 目标运动对一维距离像的影响

#### 1.1 毫米波 Costas 编码雷达成像原理

毫米波 Costas 编码雷达的发射信号是一组载频 Costas 编码的相参脉冲序列, 其数学表达式为<sup>[3]</sup>:

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} u(t - iT_r) \exp(j2\pi f_i t) \quad (1)$$

其中:  $u(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t - T/2}{T}\right)$ ,  $f_i = f_0 + (c_i - 1)\Delta f$ ,  $c_i$

为 Costas 序列,  $f_0$  为初始载频,  $\Delta f$  为跳频步长,  $N$  为脉冲个数,  $T$  为脉冲宽度,  $T_r$  为脉冲重复周期.

对于距离为  $R$  的静止目标, 经过 I、Q 正交双通道的混频、滤波及归一化综合处理, 可得目标回波信号的复包络输出:

$$G_i = \exp\left(-j2\pi f_i \frac{2R}{c}\right) \quad (2)$$

可以这样理解: 目标是一个线性系统, 雷达发射机用一组离散频率的正弦信号对它进行激励, 得到的回波信号实际上是对目标频域信息的采样, 对所得到的频域信息进行逆离散傅立叶变换, 就可得到目标的时域冲激响应, 即一维距离像. 但由于其经过 Costas 编码调制, 顺序已被打乱, 进行 IDFT 之前应

收稿日期: 2004-10-10, 修回日期: 2005-06-15

基金项目: 国防重点预研项目(41305020501)

作者简介: 刘静(1979-), 女, 重庆人, 南京理工大学, 在读博士生, 主要从事毫米波高分辨率雷达关键技术研究.

Received date: 2004-10-10, revised date: 2005-06-15

将  $G_i$  按频率步进方式整序.

### 1.2 毫米波 Costas 编码雷达多普勒性能分析

当目标和雷达间有相对运动时,式(2)表示的复包络相位有如下形式

$$\psi_i = -2\pi f_i \frac{2}{c} \left( R - vt - \frac{1}{2}at^2 \right), \quad (3)$$

其中  $R$  为目标相对雷达的初始距离,  $v$  为目标与雷达的相对径向速度,  $a$  为目标加速度,  $t = iT_r + T/2 + 2R/c$  为第  $i$  个回波脉冲的采样时刻.

首先假设在合成处理之前已对目标的相对径向速度进行了精确补偿,只考虑加速度对目标一维距离像的影响(本文仿真均采用如下参数:  $R = 308\text{m}$ ,  $f_0 = 35\text{GHz}$ ,  $\Delta f = 10\text{MHz}$ ,  $N = 64$ ,  $T = 100\text{ns}$ ,  $T_r = 40\mu\text{s}$ ).若以 ISAR 成像运动补偿精度为准,当目标加速度  $a$  的大小在式(4)确定的范围内时,其对目标一维距离像的影响可以忽略<sup>[4]</sup>

$$a \leq \lambda_0 / (4N^2 T_r^2), \quad (4)$$

按本文所采用的系统参数,图 1 给出了  $a = 300\text{m/s}^2$  时(虚线)和静止时(实线)的合成距离像,其中横轴表示逆傅立叶变换换点数(用  $N$  表示),纵轴为归一化电压值(用  $U$  表示).可见,在加速度为  $300\text{m/s}^2$  时,其对合成距离像的影响可以忽略,而这一加速度要求在工程中很容易满足.

下面我们仅分析径向速度对一维距离像的影响.将  $a = 0$ ,  $t = iT_r + T/2 + 2R/c$  代入式(3),并按频率步进方式整序,可得整序后的复包络相位为<sup>[5]</sup>

$$\psi'_i = -2\pi(f_0 + i\Delta f) \frac{2}{c} \left\{ R - v_i \left[ (c'_i - 1)T_r + \frac{T}{2} + \frac{2R}{c} \right] \right\}, \quad (5)$$

其中  $C'_i$  是与  $C_i$  由同一个 Costas 阵列变换而来的 Costas 序列.忽略常数项,上式可改写为

$$\psi'_i = -\frac{4\pi}{c} i\Delta f R + \frac{4\pi}{c} i\Delta f v_i \left( \frac{T}{2} + \frac{2R}{c} \right)$$

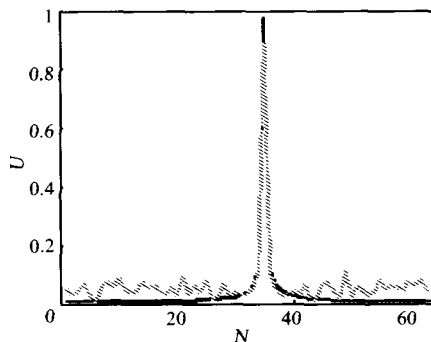


图 1 加速度对一维距离像的影响  
Fig. 1 Effect of acceleration on 1-D range profile

$$+ \frac{4\pi}{c} (f_0 + i\Delta f) v_i (c'_i - 1) T_r, \quad (6)$$

式(6)中,第一项是脉冲间正常的相位关系,决定了目标峰值在距离轴上的静态位置;第 2 项和第 1 项同为线性相位项,IFFT 合成处理后使目标合成距离像产生平移,平移的高分辨距离单元数为  $2N\Delta f v_i (T/2 + 2R/c)/c$ ,若以在相参处理时间内由速度引起的平移量不超过半个距离分辨单元为准则,因为  $R \leq T_r c/2$ ,  $T \ll T_r$ ,按照本文采用的参数,可得目标径向速度为  $2926.03\text{ m/s}$ ,因此第 2 项的影响可以忽略;第 3 项是速度对距离像的主要影响.由 Costas 序列的性质可知,该相位项在各个脉冲间没有固定的相位关系<sup>[5]</sup>,因而不存在距离-多普勒耦合,但由于其等效在采样序列的相位中加入了随机噪声,因而造成合成距离像峰值发散和衰减,旁瓣电平抬高.对于固定的雷达参数,当速度超过某一门限时<sup>[6]</sup>,目标的峰值衰减到噪声电平,无法成像.为了进行后续信号处理,必须进行运动补偿.

## 2 基于时域的一维距离像运动补偿

考虑径向速度为  $v_i$  的单个目标,连续发射  $L$  帧 Costas 信号,则第一帧和第  $L$  帧的回波信号  $s_1(t)$  和  $s_L(t)$  分别为:

$$\begin{aligned} s_1(t) &= \exp \left\{ -j2\pi \left[ f_0 + (c_i - 1)\Delta f \right] \frac{2}{c} \left[ R - v_i \left( iT_r + \frac{T}{2} + \frac{2R}{c} \right) \right] \right\} \\ s_L(t) &= \exp \left\{ -j2\pi \left[ f_0 + (c_i - 1)\Delta f \right] \frac{2}{c} \left[ R - v_i \left\{ [(L-1)N + i]T_r + \frac{T}{2} + \frac{2R}{c} \right\} \right] \right\}, \quad (7) \end{aligned}$$

按频率步进方式整序后的回波信号  $s'_1(t)$  和  $s'_L(t)$  分别为

$$\begin{aligned} s'_1(t) &= \exp \left[ -j2\pi (f_0 + i\Delta f) \frac{2}{c} \left\{ R - v_i \left[ (c'_i - 1)T_r + \frac{T}{2} + \frac{2R}{c} \right] \right\} \right] \\ s'_L(t) &= \exp \left[ -j2\pi (f_0 + i\Delta f) \frac{2}{c} \left\{ R - v_i \left[ [(L-1)N + c'_i - 1]T_r + \frac{T}{2} + \frac{2R}{c} \right] \right\} \right], \quad (8) \end{aligned}$$

令  $s(t) = s'_L(t)/s'_1(t)$ , 则

$$s(t) = \exp \left[ j \frac{4\pi}{c} (f_0 + i\Delta f) v_i (L-1) NT_r \right], \quad (9)$$

对  $s(t)$  进行  $M$  点逆傅立叶变换并取模有

$$\begin{aligned} |\text{IFFT}[s(t)]| &= \left| \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \exp \left[ j \frac{4\pi}{c} (f_0 + i\Delta f) v_i (L-1) NT_r \right] \exp \left( j \frac{2\pi}{M} li \right) \right| \\ &= \left| \frac{1}{M} \exp \left[ j \frac{4\pi}{c} f_0 v_i (L-1) NT_r \right] \sum_{i=0}^{M-1} \exp \left\{ j \frac{2\pi}{M} i \left[ l + \frac{2M\Delta f}{c} v_i (L-1) NT_r \right] \right\} \right|, \quad (10) \end{aligned}$$

由上式可知,合成距离像在  $-\frac{2M\Delta f}{c}v_i(L-1)NT_r$  处达到同相叠加,有峰值输出. 由于逆傅立叶变换的周期性,在最大不模糊距离窗内,当目标径向速度为正(靠近雷达)时,上述距离像峰值位置为  $M - \frac{2M\Delta f}{c}v_i(L-1)NT_r$ ,而当目标径向速度为负(远离雷达)时,距离像峰值为  $-\frac{2M\Delta f}{c}v_i(L-1)NT_r$ ,故同一峰值会对应正、负两个不同的速度. 为了解决这个问题,在进行逆傅立叶变换前将回波数据进行相位补偿,使合成距离像峰值向右平移  $M/2$  个距离单元,则在最大不模糊距离窗内的距离像峰值位置  $l$  为

$$l = \frac{M}{2} - \frac{2M\Delta f}{c}v_i(L-1)NT_r, \quad (10)$$

即有

$$v_i = \left(\frac{M}{2} - l\right)c/[2M\Delta f(L-1)NT_r], \quad (11)$$

同时由于逆傅立叶变换的周期性,回波峰值会同时出现在  $kM + l$  ( $k$  为正整数) 处,因此无模糊测速范围  $v_{range}$  为  $\left[-\frac{c}{4\Delta f(L-1)NT_r}, \frac{c}{4\Delta f(L-1)NT_r}\right]$ .

### 3 仿真实验

为了考察上述方法的性能,本文采用 1.2 节所述参数对单点运动目标,在  $[-300\text{m/s}, 300\text{m/s}]$  的速度范围内进行了速度补偿仿真实验. 仿真中对回波复采样数据添加了不同信噪比的复高斯白噪声,  $L$  帧信号的获取利用采样存储设备同时记录  $L$  帧回波数据来实现. 图 2、图 3 分别给出了  $M = 1024, L = 5$  (在本文的雷达系统参数下,无模糊测速范围为  $[-732.42\text{m/s}, 732.42\text{m/s}]$ ,这显然能满足工程要求),信噪比为  $\text{SNR} = 15\text{dB}, 5\text{dB}$  时的速度估计曲线. 其中横轴为目标真实速度,用  $V$  表示;纵轴为估计速度,用  $V_e$  表示. 可见,在无模糊测速范围内和一定的信噪比条件下,通过选择合适的参数  $M, L$  值,算法总能得到精确的速度估计值.

仿真中发现,当雷达参数固定时,速度估计精度由  $M, L$  决定. 由式(11)可知,当信号  $s(t)$  峰值位置变化 1 时,对应的目标速度变化  $\Delta v_i$  为

$$\Delta v_i = \frac{c}{2M\Delta f(L-1)NT_r}, \quad (12)$$

即目标运动速度变化在这个范围内时所得到的估计速度相同,这就造成了测速误差,所以增大  $M$  和  $L$  的取值有利于提高测速精度.

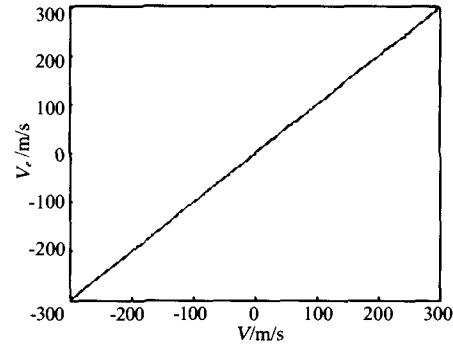


图 2 速度估计曲线( $\text{SNR} = 15\text{dB}$ )  
Fig. 2 Estimated velocity( $\text{SNR} = 15\text{dB}$ )

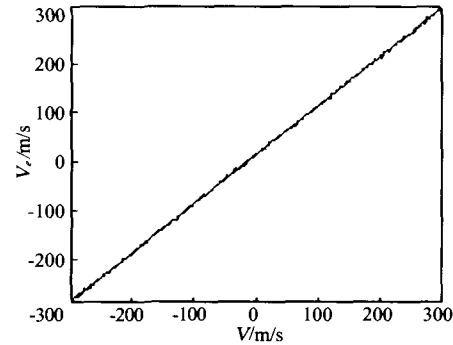


图 3 速度估计曲线( $\text{SNR} = 5\text{dB}$ )  
Fig. 3 Estimated velocity( $\text{SNR} = 5\text{dB}$ )

令  $L = 2$  (只考虑  $M$  对算法测速精度的影响),增大  $M$ ,即增大算法的采样分辨率,可以减小 IFFT 的栅栏效应,提高测速精度,但同时增加了算法的计算量. 如果  $M$  的取值过小,速度补偿曲线又会出现明显的阶梯状<sup>[7]</sup>;同理,取  $M$  为跳频脉冲个数  $N$  (只考虑  $L$  对算法测速精度的影响),  $L$  增大,也有利于提高测速精度,改善阶梯状曲线形状,但却减小了无模糊测速范围,同时增加了系统的成本和复杂度. 下表给出了取不同  $M$  和  $L$  值时的理论测速精度值,同时给出了相应的最大不模糊测速范围,工程实现时可以参考选取合适的参数值.

由于同时利用了第一帧和第  $L$  帧的信号来实现速度补偿,因此进行第一次速度估计需要通过发射  $L$  帧信号来实现,但以后每次速度估计可在每帧发射信号时间内完成(利用第二帧和第  $L + 1$  帧回波信号,以此类推),因而该方法具有计算量小、快速的优点.

### 4 结束语

本文提出一种基于时域的速度估计方法对毫米波 Costas 编码运动目标一维距离像进行运动补偿,并

表 1 不同  $M, L$  值对应的理论测速精度、最大不模糊测速范围表  
Table 1 Academic velocity precision and maximum discriminable velocity vs  $M, L$

$M$	256	256	512	512	1024	1024
$L$	23	35	12	18	6	10
$\Delta v_r$ (m/s)	1.04	0.67	1.04	0.67	1.14	0.64
$v_{range}$ (m/s)	[-133.2, 133.2]	[-86.2, 86.2]	[-266.3, 266.3]	[-172.3, 172.3]	[-585.9, 585.9]	[-325.5, 325.5]

通过仿真实验证明了这种方法的可行性、快速性. 利用本文提出的方法进行运动补偿所得的目标一维距离像可以进一步应用于毫米波 Costas 编码雷达的目标识别技术中.

## REFERENCES

- [1] SUN Chang-Gui, LI Xing-Guo. Two-step stretch processing method for MMW high-resolution radar [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙长贵, 李兴国. 毫米波高分辨雷达二步伸缩处理方法. *红外与毫米波学报*), 2003, 22(6): 457—460.
- [2] ZENG Yong-Hu, WANG Xue-Song, XIAO Shun-Ping, et al. High-resolution radar target recognition based on correlation of instantaneous polarization WVD [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (曾勇虎, 王雪松, 肖顺平, 等. 基于瞬态极 WVD 相关的高分辨率雷达目标识别. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(6): 455—458.
- [3] LIU Jing, LI Xing-Guo, Wu Wen. Application of waveform entropy method for motion compensation of MMW Costas frequency hopped radar [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (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. *红外与毫米波学报*), 2003, 22(4): 303—306.
- [4] LIU Zheng, ZHANG Shou-Hong. Estimation of target motion parameter in a stepped-frequency pulses radar [J]. *Acta electronica sinica* (刘铮, 张守宏. 步进频率雷达目标的运动参数估计. *电子学报*), 2003, 28(3): 43—45.
- [5] MU Shan-Xiang, LI Xing-Guo, KONG De-Chun. Doppler performance analysis of interpulse Costas FH radar signal [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (牟善祥, 李兴国, 孔德春. 脉间 Costas FH 雷达信号的多普勒性能分析. *红外与毫米波学报*), 2000, 19(4): 313—317.
- [6] Wehner D R. High resolution radar [M]. London: Artech House Inc, 1997.
- [7] Jiang Nan-Zhi, Wang Mao-Lu, Li Shao-Hong, et al. Compensation methods for stepped frequency radar HRR imaging [J]. *Journal of Electronics* (蒋楠稚, 王毛路, 李少洪等. 频率步进脉冲距离高分辨一维成像速度补偿分析. *电子科学学刊*), 1999, 21(5): 665—670.

(上接第 343 页)

## 3 结论

本文提出了一种新型微带左手传输线结构, 并证明了它具有左手材料的后向辐射和相位超前的特征. 由于该结构简单紧凑, 所以它特别适用于微波集成电路和毫米波集成电路. 文中给出了一个左-右手混合微带线在毫米波微带阵列中应用的例子, 利用左手传输线相位超前的特性, 控制阵列馈电点间的零相位差, 来克服辐射方向图的偏移.

## REFERENCES

- [1] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of and [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, 4: 509—514.
- [2] Christophe Caloz, Itoh T. Application of the transmission line theory of left-handed (LH) materials to the realization of a microstrip 'LH line' [J]. *APS. IEEE*, 2002, 2: 16—21.
- [3] Lindell I V, Tretyakov S A, Nikoskinen K I, et al. Bw media-media with negative parameters, capable of supporting backward waves [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2001, 31: 129—133.
- [4] Ramesh Garg. *Microstrip Antenna Design Handbook* [M]. Boston: Artech House, 2001.
- [5] WU Zhan-Zhan, XU Shan-Jia. Rigorous mode matching analysis of transmission characteristics for periodic dielectric structures [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (伍瞻瞻, 徐善驾. 周期介质结构传输特性的严格模匹配分析. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(1): 21—26.
- [6] JING Heng-Zhen, XU Shan-Jia. Mode matching analysis of a new omnidirectional circular rod antenna with double dielectric gratings for millimeter-wave application [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (靖恒珍, 徐善驾. 新型双介质栅毫米波棒形全向天线的模匹配分析. *红外与毫米波学报*), 2003, 22(4): 241—245.