一种频率步进雷达目标径向速度估计方法

田进军 刘 林 薛明华

(北京航空航天大学 电子信息工程学院，北京 100191)

摘 要：为补偿目标径向速度对频率步进雷达合成距离像的影响，提出了一种目标径向速度估计方法.经公式推导证明频率步进雷达相邻两个脉组回波的归一化采样序列的互相关函数是一复正弦序列，该序列的频率与目标径向速度有确定的对应关系.通过快速傅里叶变换(FFT，Fast Fourier Transform)可获得序列频率，从而估计出目标径向速度.该方法可估计的速度范围仅取决于系统带宽和脉冲重复周期，并且由于理论估计精度可通过FFT点数调整，在需要非常高估计精度的场合可以大幅降低计算量.计算机仿真结果表明该方法对目标径向速度估计准确，同时具有较好的抗噪声性能.

关 键 词：频率步进；速度补偿；速度估计；互相关函数；快速傅里叶变换

中图分类号：TN 958

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)06-0673-04

New estimation method of target's radial velocity for stepped-frequency radar

Tian Jinjun Liu Lin Xue Minghua

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A new radial velocity estimation method was presented to compensate the effects of the target's radial velocity on range profiles synthesized from a stepped-frequency radar. Theoretical analysis indicates that the correlation function derived from two sequential bursts' normalized complex samples of a stepped-frequency radar is a complex sinusoidal sequence, and the sequence's frequency is related to the target's radial velocity. So the target's radial velocity can be estimated with the sequence's frequency calculated by fast Fourier transform (FFT) algorithm. The estimable velocity range of this method is applicable depends only on the system bandwidth and the pulse repetition period. As the theoretical estimation resolution is determined by the point number of FFT, computational cost can be saved in the case of high estimation resolution is required. Simulation results show that this method can estimate the target's radial velocity accurately with good anti-noise performance.

Key words: stepped-frequency; velocity compensation; velocity estimation; correlation function; FFT(fast Fourier transform)

频率步进雷达信号通过多个瞬时带宽极窄的脉冲信号合成宽带信号[1]，在获得高距离分辨力的同时极大地降低了对发射/接收机的处理带宽要求，是一种实用的、易于工程实现的高分辨力信号形式[2].但是利用多个脉冲进行相参积累的信号处理方式也使频率步进雷达信号对目标的运动比较敏感.目标的径向运动会产生距离-多普勒耦合效应，造成目标合成距离像的偏移、展宽及幅度下降[3]，严重影响成像质量.因此在成像前必须对目标的运动进行精确补偿.为实现目标运动的精确补偿，对目标径向速度的精确估计是必须解决的一个关键问题.

对目标径向速度的估计方法可分为两类.一类是通过回波数据直接计算求取目标速度，如时

收稿日期：2007-05-14

作者简介：田进军(1981—)，男，湖北荆州人，博士生，jimtian@ee.buaa.edu.cn.

域互相关和频域互相关法[4]等.另一类是利用构造的评价函数在一定速度范围搜索最大值/最小值获得目标速度,如最小波形熵法[5],最小脉组误差法[6],最小脉组相位差分法[7]等.

本文对目标径向速度引起的距离-多普勒耦合效应进行了分析,在此基础上提出了一种直接计算目标径向速度的新方法,并通过计算机仿真研究了该方法对目标径向速度的估计精度和抗噪声性能.

1 目标径向速度对距离像的影响

考虑距离雷达为 R,以径向速度 v 向雷达运动的理想点目标,经雷达接收机正交解调输出的幅度归一化采样信号可表示为

$$A_n = \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f_n \frac{2}{c}(R-vt_n)} \tag{1}$$

其中 $n=0,1,\cdots,N-1$,N 为雷达发射的一串脉组信号中子脉冲的个数,也即频率步进点数;$f_n=f_0+n\Delta f$,f_0 为起始频率,Δf 为频率步进量;采样时刻 $t_n=nT+t_s$,T 为脉冲重复周期,t_s 为一个脉冲重复周期内采样时刻相对发射脉冲的延时;c 为光速.

将 f_n 及 t_n 代入式(1)可得第 n 个子脉冲解调输出的相位为

$$\varphi_n = -2\pi f_0 \frac{2}{c}(R-vt_s) - 2\pi \frac{2R}{c}n\Delta f + 2\pi \frac{2v}{c}n(f_0T+\Delta ft_s) + \frac{4\pi n^2 \Delta f v T}{c} \tag{2}$$

式中第1项为常数相位,第2项是由目标距离与步进频率耦合产生的线性相位项,代表目标的距离,第3项和第4项是由目标运动引起的多普勒频移,其中第3项造成目标距离像位置偏移,第4项是多普勒2次项,造成目标距离像展宽及幅度降低.

仅考虑式(2)中的第3项,与第2项对比可得由于径向速度引起的目标距离像偏移

$$\Delta R = R' - R = -v(f_0T+\Delta ft_s)/\Delta f \tag{3}$$

文献[8]的分析表明第4项引起的点目标距离像展宽为

$$\Delta R_s = 2NvT \tag{4}$$

图1给出了理想点目标在不同速度下的成像结果.仿真使用的系统参数为:$f_0=10$ GHz,$N=6\,000$,$\Delta f=50$ kHz,$T=150$ μs,$t_s=75$ μs,$R=11$ km.由图1可明显看出目标径向速度对距离像造成的偏移及展宽效应.

以上分析表明,为实现目标高距离分辨力成像,必须对目标径向速度进行补偿.若目标径向速度估值为 v',则可对采样序列乘以相应的补偿因子 C_n 来补偿目标径向速度的影响:

$$C_n = \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f_n \frac{2}{c}v't_n} \tag{5}$$

当 $v'=v$ 时,可完全抵消径向速度的影响,因此,对速度的准确估值是进行速度补偿的关键.

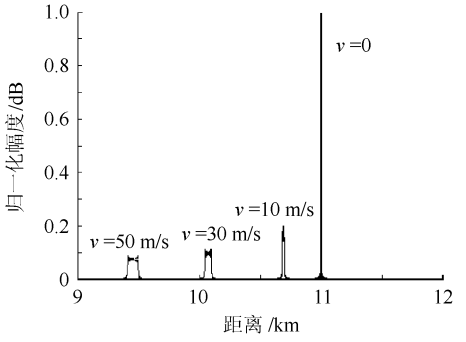


图1 径向速度对距离像的影响

2 互相关-FFT方法

取两串相邻的脉组信号的采样序列,其归一化采样输出分别为

$$\left.\begin{aligned} A_n &= \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f_n \frac{2}{c}(R-vt_n)} \\ A_{N+n} &= \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f_n \frac{2}{c}(R-vt_{N+n})} \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

上式中两序列的互相关函数为

$$S_n = A_n^* A_{N+n} = C\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi n\Delta f \frac{2}{c}vNT} \tag{7}$$

其中 $C=\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_0 \frac{2}{c}vNT}$ 是与 n 无关的常数.对序列 S_n 作傅里叶分析可知,幅频响应曲线上取得最大值的频率点即 $\dfrac{4\pi\Delta f v NT}{c}$.

根据以上分析,对式(7)作 N_{fft} 点FFT并取模值得到幅度响应 S_k.若 S_k 中最大值对应的序号为 $k_{\max}$,则由下式估计速度

$$\left.\begin{aligned} \frac{4\pi\Delta f v' NT}{c} &= \frac{2\pi}{N_{\mathrm{fft}}}k_{\max} \\ v' &= \frac{ck_{\max}}{2N_{\mathrm{fft}}N\Delta fT} \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

由于FFT是在频域上的离散取值,v' 通常并不等于 v.由式(8)可得理论上最大估计误差为

$$v_e = \frac{c}{2N_{\mathrm{fft}}N\Delta fT} = \frac{\Delta R_r}{N_{\mathrm{fft}}T} \tag{9}$$

其中 $\Delta R_r = \dfrac{c}{2N\Delta f}$ 是系统的理论分辨力.由式(9)可知,当系统参数固定时,只要通过选择合适的FFT点数就可获得所需速度估计精度.

考虑到速度可以是正值也可是负值,取 S_k 的主值区间为 $k\in\left[-\dfrac{N_{\mathrm{fft}}}{2},\dfrac{N_{\mathrm{fft}}}{2}-1\right]$,则由式(8)可得上述互相关-FFT方法进行速度估计的最大不模糊区间为

$$v \in \left[-\frac{\Delta R_r}{2T}, \frac{\Delta R_r}{2T} - v_e\right] \tag{10}$$

以第 1 节中仿真所使用的参数,取 FFT 点数为 N,v 的范围为−1666.7～1666.1 m/s,实际中大部分目标的运动速度都包含在此范围内.

当考虑一个由多散射点构成的实际目标时,回波信号是各个散射点回波的线性叠加,此时虽然归一化采样序列不再是式(6)的形式,但式(7)仍然成立,因此互相关-FFT 方法对多散射点目标同样适用.

3　仿真结果

仿真的目标由 3 个散射点组成,归一化反射强度分别为 1,10 和 100,对应的散射点位置为 11 km,11.01 km 及 11.015 km,目标径向速度为 50 m/s,FFT 点数取 8192 点,对应的估计精度为 0.41 m/s,其余参数与第 1 节中使用的仿真参数相同.通过对目标采样序列加入高斯白噪声考察互相关-FFT 方法的抗噪声性能.

图 2 是信噪比为−6 dB 时的 S_k 曲线.为便于观察,图中将横坐标 k 转换为对应的 v 的取值.图中所示 S_k 的峰值对应的 v 为 50.05 m/s,表明互相关-FFT 方法具有较好的估计精度.

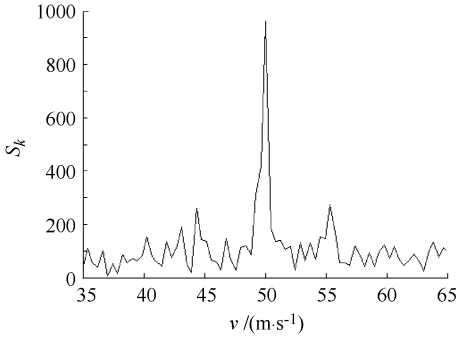
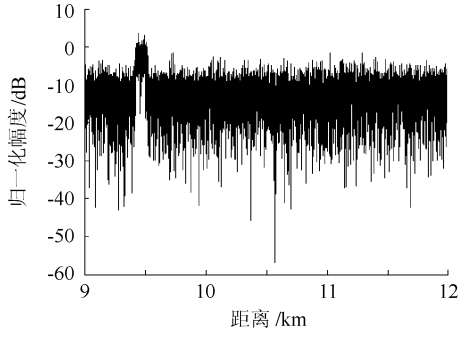


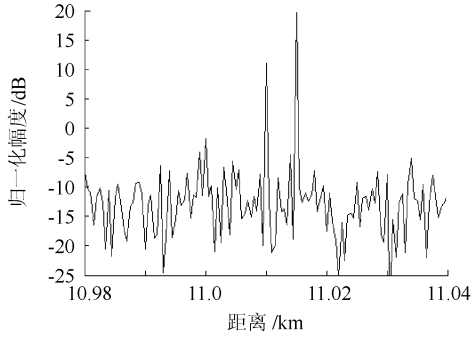
图 2　S_k-v 曲线(信噪比−6 dB)

目标在速度补偿前及利用互相关-FFT 方法获得的速度估值进行补偿后距离像的对比如图 3 所示.由图 3 可见,通过补偿,目标径向速度造成的距离像偏移及展宽效应得到消除,成像效果良好,说明互相关-FFT 方法也适用于多散射点目标的速度估计.

图 4 为分别使用文献[6]的最小脉组误差法和本文的互相关-FFT 方法在同一信噪比下连续进行 100 次试验得到的速度估计性能曲线.最小脉组误差法速度搜索范围为 45～55 m/s,速度搜索步进为 0.4 m/s,与互相关-FFT 方法的理论估计精度相当.可以看出,当信噪比高于−10 dB 时,互相关-FFT 方法对目标速度的估计误差均方值仅为 0.05 m/s,当信噪比低于−10 dB 时,估计性能则急剧下降.主要是由于互相关-FFT 方法通过频域分析寻找目标速度对应的谱线位置,当信噪比高于一定水平,谱线高于噪声电平,则能准确估计目标速度,而当信噪比低于该水平时,该谱线处于噪声电平之下,从而无法估计目标速度,造成性能急剧下降.最小脉组误差法的估计性能随信噪比变化较平缓,主要因为其评价函数是累加形式,对高斯白噪声有较好的抑制作用.由于该方法采用搜索方式,且评价函数主瓣很窄,搜索步进过大会错过主瓣峰值,在信噪比较高的情况下仍然无法提高估计精度,而较小的搜索步进又会引起计算量的急剧增加.



a　速度补偿前



b　速度补偿后

图 3　距离像补偿前后对比

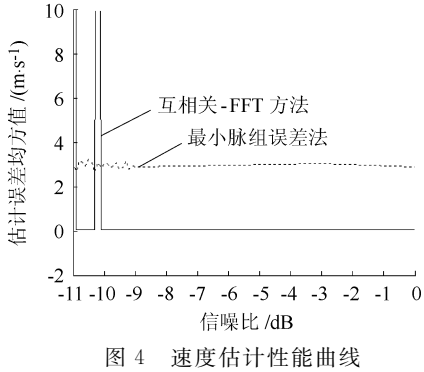


图 4　速度估计性能曲线

4　结 束 语

本文提出了一种用于频率步进雷达目标速度估计的互相关-FFT 方法.该方法通过一次 FFT

计算即可估计出最大不模糊区间内的任意速度值,且估计误差可通过FFT点数调整,可极大减少计算量.计算机仿真结果表明该方法对目标径向速度估计准确,同时具有较强的抗干扰能力.

参考文献(References)

[1] Wehner D R. High-resolution radar[M]. Norwood: Artech House, 1987:159-160

[2] 彭刚,田进军,王振荣. 双通道脉间变频外场RCS测试雷达的研究[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(9):1582-1585
Peng Gang, Tian Jinjun, Wang Zhenrong. Research on two-channels pulse to pulse frequency shifting outdoor RCS measurement radar [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(9):1582-1585 (in Chinese)

[3] 龙腾. 频率步进雷达信号的多普勒性能分析[J]. 现代雷达, 1996, 18(2):31-37
Long Teng. Doppler performance analysis of frequency stepped radar signal [J]. Modern Radar, 1996, 18(2):31-37 (in Chinese)

[4] 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[J]. 电子与信息学报, 1999, 21(5):665-670
Jiang Nanzhi, Wang Maolu, Li Shaohong, et al. Compensation methods for stepped frequency radar HRR Imaging [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 1999, 21(5):665-670(in Chinese)

[5] 刘静,李兴国. 毫米波高分辨率雷达运动补偿研究[J]. 现代雷达, 2004, 26(7):21-23
Liu Jing, Li Xingguo. Research on motion compensation in MMW high resolution radar [J]. Modern Radar, 2004, 26(7):21-23(in Chinese)

[6] 刘峥,张守宏. 步进频率雷达目标的运动参数估计[J]. 电子学报, 2000, 28(3):43-46
Liu Zheng, Zhang Shouhong. Estimation of rarget motion parameter in a stepped frequency pulses radar [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3):43-46(in Chinese)

[7] 牛涛,陈卫东. 脉冲步进频率雷达的一种运动补偿新方法[J]. 中国科学技术大学学报, 2005, 35(2):161-166
Niu Tao, Chen Weidong. A new method of motion compensation for pulse stepped-frequency radars [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2005, 35(2):161-166(in Chinese)

[8] 彭刚,梁沂,王振荣. 目标速度对脉间变频格式RCS测试的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(11):1190-1193
Peng Gang, Liang Yi, Wang Zhenrong. Object's velocity effect on pulse to pulse frequency shifting RCS measurement [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(11):1190-1193(in Chinese)

(责任编辑:娄 嘉)

(上接第672页)

4 结束语

按需路由方式在MANET网络中得到广泛应用,而路由中断频繁触发的路由发现过程给网络带来了较大的开销.本文提出的局部路由发现算法通过限制路由发现搜索范围,降低路由发现过程的网络开销,进而提高网络性能,该方法适合任何基于广播方式进行路由发现的按需路由协议.在降低网络路由开销的同时,如何得到最短路径及带宽最优路径,将是本文下一步的研究内容.

参考文献(References)

[1] Johnson D B, Maltz D A. The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks[EB/OL]. Internet-draft, draft-ietf-manet-dsr-10. txt, http://tools. ietf. org/html/draft-ietf-manet-dsr-10, 2004

[2] Castaneda R, Das S R. Query localization techniques for on-demand routing protocols in ad-hoc networks[C]//The 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 1999: 186-194

[3] Hu Xuhui, Liu Yong, Lee M J, et al. Route update and repair in wireless sensor networks[C]//IEEE Consumer Communications and Networking Conference. New York: IEEE Press, 2004:82-87

[4] Liu Yuhua, Zhu Haiyan, Xu Kaihua, et al. An improved route repair approach of wireless sensor networks[C]//The First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences, 2006, 2(1): 662-665

[5] Ko Young-Bae, Nitin H, Vaidya. Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks[J]. Wireless Networks, 2000, 6(4): 307-321

[6] Velmurugan A, Rajaram R. Adaptive multiagent routing protocol using location sensing - hybrid wireless networks [C]//Proceedings of 2005 International Conference on Intelligent Sensing and Information Processing, ICISIP05. 2005, 25-31

[7] Gossain Hrishikesh, Joshi Tarun, De Morais Cordeiro Carlos, et al. DRP: an efficient directional routing protocol for mobile ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(12): 1438-1451

(责任编辑:吴 琼)