

雷达信号的加速度分辨力分析及应用

赵宏钟,付 强,周剑雄

(国防科技大学 ATR 实验室,湖南长沙 410073)

摘 要: 针对雷达信号处理中受到的运动目标越来越高的加速度调制影响,本文首先提出了加速度模糊函数的概念,在此基础上定义了信号波形的加速度分辨力,然后导出了矩形包络信号的加速度模糊函数表达式,得到了矩形包络信号的加速度分辨能力与信号相参积累时间的平方成反比的结论,并且将结论应用于多卜勒测速雷达的信号参数设计和性能分析,仿真验证了有关结论。

关键词: 加速度分辨力; 加速度模糊函数; 匹配滤波器; 信噪比; 积累

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 06-0958-04

The Analysis of Acceleration Resolution and Application for the Radar Signal

ZHAO Hong-zhong, FU Qiang, ZHOU Jian-xiong

(The ATR laboratory of NUDT, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Aiming at the influence caused by the higher acceleration of moving target on the radar signal processing, we present the concept of acceleration ambiguity function firstly, then define acceleration resolution on the basis and introduce the expression of acceleration resolution for rectangle pulse signal. It is concluded that the acceleration resolution is inversely proportional to the quadratic of signal accumulatory duration. At last, we apply the conclusion to the parameter designing and performance analysis for a Doppler radar. Simulation justifies the conclusion.

Key words: acceleration resolution; acceleration ambiguity function; matched filter; signal-noise ratio; accumulation

1 引言

在雷达、声纳领域中经常需要对机动目标的时变回波信号进行处理。例如,导弹目标逼近告警雷达时,由于来袭导弹大多具有很高的速度和加速度,雷达回波信号中不仅含有目标速度引起的多卜勒调制项,而且目标加速度引起的二次相位项也对回波信号产生时变调制^[1]。在多卜勒雷达中,频率(速度)分辨率取决于信号的有效相参积累时间,积累时间越长,频率(速度)分辨率就越高,同时弱信号的积累检测性能也越高。但是目标做加速运动时,回波信号的多卜勒频率为时变量,基于FFT处理的相参积累^[2]输出信噪比下降,检测性能下降,多卜勒分辨率降低。为此很多学者提出了针对这种时变信号特点的处理方法。如文献[1,2]采用了时频分析和Hough变换相结合的方法检测含线性调频因子的信号回波,估计信号的调频斜率;文献[1]还提出用多项式相位信号处理和解相位模糊的方法对线性调频信号做检测和参数估计。这些研究都涉及到对含有加速度调制的非线性相位信号做匹配检测和加速度估计问题。但是,加速度调制对多卜勒匹配滤波器输出信噪比下降的影响有多大?如何定量地衡量这种影响?加速度的分辨力如何定义?对加速度进行匹配和估计的精度与信号

参数有什么关系?这些问题至今仍未有见到系统的研究成果。本文就是要试图解决这些问题。全文的安排如下:第二部分提出加速度模糊函数的概念,在此基础上定义信号的加速度分辨力,研究加速度对多普勒匹配滤波器输出信噪比下降的影响并推导出匹配滤波器的多卜勒容限;第三部分将这些结论具体应用到某多卜勒测速雷达的性能分析中,得出检测加速运动目标的最佳相参积累时间;第四部分总结全文的工作。

2 加速度分辨力的定义

2.1 加速度模糊函数的概念

模糊函数是对雷达信号波形进行分析和设计的一种有力工具。为了刻画和分析信号对两个雷达目标的距离、速度等参数的测量分辨能力,美国学者Woodward在1953年首先提出了模糊函数^[3]的概念:

$$A(\tau, f_d) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \cdot u^*(t + \tau) e^{j2\pi f_d t} dt \quad (1)$$

式中, τ 表示回波时延, f_d 表示多卜勒频移, $u(\cdot)$ 为雷达发射信号的波形函数。

模糊函数表征了雷达在信号波形一定的条件下对具有不同距离、速度参数的两个目标的固有分辨能力。可以看出,模糊函数同时也描述了雷达对单目标的距离、速度的理论测量精度^[4]。需要指出的是:Woodward在推导模糊函数时,采用的是“点目标”回波的数学模型,而且仅仅考虑了雷达回波信号中目标的距离和速度参数,忽略了其他特征参数(如加速度)。因此(1)式定义的模糊函数只适用于一般的窄带信号以及目标运动加速度比较小,在信号持续周期内可以忽略的场合^[4]。正如引言中所述,随着雷达目标机动加速度越来越大,在很多场合中加速度对信号的二次相位调制已经不能被忽略。考虑到目标的加速度影响,目标回波信号的数学模型可以表示为:

$$s_r(t) = u(t - \tau) e^{j2f_0(t - \tau)} \\ = u(t - \tau) e^{j2f_0 t} e^{-j4f_0 R_0/c} e^{j2f_d t} e^{j(\frac{a}{2c})t^2} \quad (2)$$

其中

$$= 2 \frac{R_0 - v \cdot t - \frac{1}{2}at^2}{c}$$

$$f_d = f_0 \frac{2v}{c} = \frac{2v}{\lambda}$$

$$a = f_0 \frac{2a}{c} = \frac{2a}{\lambda}$$

R_0 为初始距离, v 为目标初始速度, a 为目标加速度, c 为光速, f_0 为信号载频, λ 为电磁波长, f_d 为多卜勒率。需要特别指出的是,多卜勒率 f_d 与加速度 a 满足关系: $f_d = 2 \cdot a / \lambda$, 在下文中对二者并不加以严格区别,统称为加速度,但在计算时要小心区分,这两者的量纲是不一样的。

忽略包络形状的变化和常数相位因子,相对于发射信号,回波信号发生了时延、频移和二次项相位因子调制。

信号波形的距离—速度—加速度模糊函数定义为

$$A(\tau, f, a) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \cdot u^*(t + \tau) e^{j2\pi(f\tau + \frac{1}{2}at^2)} dt \quad (3)$$

从式(3)可以看到,信号波形的距离—速度—加速度模糊函数是一个包含 3 个自变量的多维空间体函数。其物理意义为两个相距为 τ , 频差为 f , 加速度差为 a 的目标的模糊程度。

2.2 单载频矩形脉冲信号的加速度模糊函数

单载频矩形脉冲信号的归一化复包络可写为^[4]:

$$u_0(t) = \begin{cases} 1/\sqrt{T}, & -T/2 < t < T/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中 T 表示信号持续时间。那么,由式(3)得到单载频矩形脉冲信号的加速度模糊函数为:

$$A_0(\tau, f, a) = \int_{-T/2}^{T/2} u_0(t) \cdot u_0^*(t + \tau) e^{j2\pi(f\tau + \frac{1}{2}at^2)} dt \\ = \int_{-T/2}^{T/2} u_0^*(t + \tau) e^{j2\pi(f\tau + \frac{1}{2}at^2)} dt \quad (5)$$

在没有时延、频率失配时:

$$A_0(0, 0, a) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e^{j\pi a t^2} dt$$

$$\frac{1}{\sqrt{2|a|}} \int_{-\sqrt{2|a|}T/2}^{\sqrt{2|a|}T/2} e^{j\sqrt{2|a|}u^2 \text{sign}(a)} du, \text{ 令 } u = \sqrt{2|a|}t \\ \frac{1}{x} \int_C(x) + \text{sign}(a) \cdot jS(x) \cdot j, \text{ 记 } \sqrt{2|a|}T/2 = x \quad (6)$$

式中: $C(x) = \int_0^x \cos(\frac{1}{2}u^2) du$, $S(x) = \int_0^x \sin(\frac{1}{2}u^2) du$ 分别表示菲

涅尔余弦和菲涅尔正弦函数。

$A_0(0, 0, a)$ 表示了归一化矩形包络对加速度失配的适应能力。图 1 是 $|A_0(0, 0, a)|^2$ 的示意图。单载频矩形包络信号的加速度模糊函数具有多个旁瓣,可以证明,第一旁瓣的电平约为 -8.8dB。同样地可以分别得到 $A_0(0, f, a)$ 和 $A_0(\tau, 0, a)$ 等(具体推导过程略),图 2 是 $|A_0(0, f, a)|$ 的示意图。

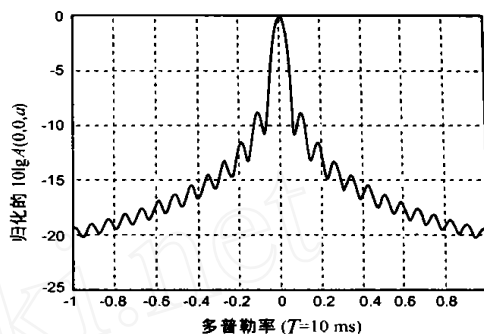


图 1 矩形脉冲的加速度模糊函数 $|A_0(0, 0, a)|^2$

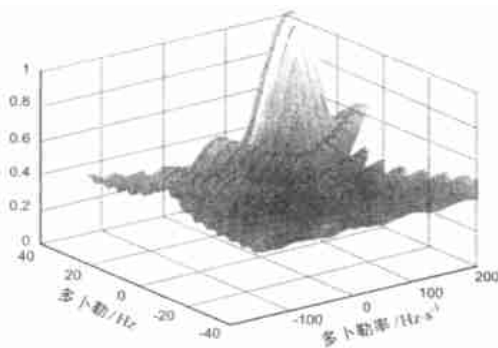


图 2 矩形脉冲的速度-加速度模糊函数 $|A_0(0, f, a)|$

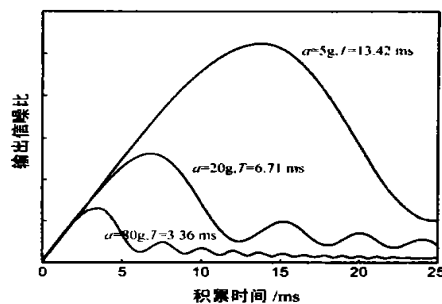


图 3 匹配滤波器最大输出信噪比与积累时间的关系

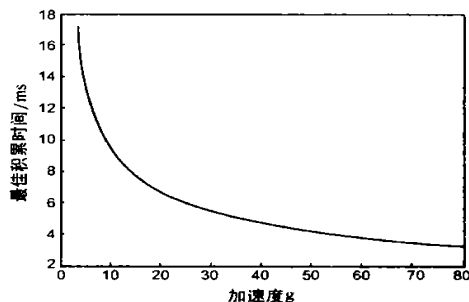


图 4 最佳积累时间与加速度的关系

2.3 加速度分辨力的定义

加速度模糊函数表征了雷达信号波形对多卜勒率相差的两个目标的分辨能力,同时也描述了雷达信号波形对单目标加速度的测量精度.由此可以根据加速度模糊函数来定义信号加速度的分辨力.

定义 1 信号的归一化加速度模糊函数 $A(0,0)$ 主瓣的 -3dB 宽度(也可定义为 -4dB 宽度),称为该信号的加速度名义分辨力.

加速度名义分辨力表示了信号对加速度模糊函数主瓣内邻近目标的分辨能力.

根据式(6)可以证明,加速度模糊函数的 3dB 半波瓣宽度为 $3.4742/T^2$,因此单载频矩形脉冲信号的加速度名义分辨力

$$\Delta a = \frac{6.9484}{T^2} \quad (7)$$

可见信号对加速度的固有分辨力 Δa 与信号有效持续时间的平方成反比.

2.4 多卜勒匹配滤波器的加速度容限分析

在雷达接收机中,常用匹配滤波器实现最佳接收,使输出信噪比最大(只考虑高斯白噪声环境).以多卜勒测速雷达为例,若发射信号为一单载频相参脉冲串,且只考虑目标径向速度带来的线性相位调制,那么对应的最佳接收机就是频域为梳齿状的多卜勒匹配滤波器,例如 FFT 处理,就等效于一个具有线性相位的多卜勒匹配滤波器组^[6].但是对于某些加速度较大的目标,回波信号中还有目标加速度引起的二次相位调制,如式(2)所示,此时多卜勒匹配滤波器发生失配现象.考察多卜勒滤波器在失配情况下输出性能的下降程度与加速度的关系,是衡量多卜勒匹配滤波器性能的一个指标.

一般可以把多卜勒匹配滤波器的输出信号能量降低 3dB 时对应的加速度值称为匹配滤波器的加速度容限.

仍然以单载频矩形脉冲为例,设接收信号复包络为:

$$s(t) = u(t - \tau) e^{j2(f_d + \frac{1}{2} a t^2)}, \quad 0 < t - \tau < T \quad (8)$$

多卜勒匹配滤波器组的冲激响应可写为:

$$h(t) = u(t - \tau)^* e^{j2f_d t}$$

输出信号为:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t - \tau) \cdot h(\tau) d\tau$$

略去幅度为 1 的相位因子,有

$$y(t) = T \int_{-\infty}^{\infty} u_0(t - \tau + \tau) u_0^*(\tau) e^{j2(f_d - f + \frac{1}{2} a t^2 - \frac{1}{2} a \tau^2)} d\tau$$

$$e^{j2\frac{a}{2} t^2} d = T \cdot A_0(-t, f_d - f + \frac{1}{2} a t^2 - \frac{1}{2} a \tau^2, a) \quad (9)$$

其中, $u_0(t)$ 是式(4)定义的单载频矩形脉冲信号的归一化复包络, $A_0(f, a)$ 是它的三维模糊函数,由式(5)定义.

多卜勒滤波器组可以对时延和频移进行匹配,

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{当 } t = \tau \\ f = f_d + \frac{1}{2} a(t - \tau)^2 \end{array} \right. \text{时, 输出幅度最大,}$$

$$|y|_{\max} = T |A_0(0, 0, a)|$$

由式(7), (9)可以推出发射矩形单脉冲信号时匹配滤波器的加速度容限为:

$$\Delta a_{3\text{dB}} = \pm \frac{3.4742}{T^2} \quad (10)$$

3 用加速度模糊函数分析某多卜勒测速雷达对加速运动目标的检测、分辨性能

前面提出了加速度模糊函数的概念,定义了雷达信号波形的加速度分辨力,并导出了矩形脉冲包络的加速度模糊函数、加速度分辨力和多卜勒匹配滤波器加速度容限.本节将以一多卜勒测速雷达为例,具体分析加速度分辨力、加速度容限及检测性能与雷达设计参数的关系,得到一些有益的结论,并给出仿真验证.

不失一般性,假定雷达发射信号为单载频矩形信号,载频 $f_0 = 35 \text{ GHz}$.

若信号的有效相参积累时间为 $T = 10 \text{ ms}$, 由(10)式可得相应的加速度容限为: $a = \pm 3.4742/T^2 = \pm 148.9 \text{ m/s}^2 = \pm 15 \text{ g}$ (g 为重力加速度).也就是说,积累时间为 10ms 时,目标加速度超过 15g,多卜勒滤波器的输出峰值下降将超过 3dB.

考虑二值假设检验问题

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0: x(t) = n(t) \\ H_1: x(t) = s(t) + n(t) \\ \quad = b(t) \exp[j2(f_d t + \frac{1}{2} a t^2)] + n(t), \\ \quad -T/2 < t < T/2 \end{array} \right.$$

上式中,假设接收噪声 $n(t)$ 为复高斯白噪声,服从正态分布 $N(0, N_0)$, N_0 代表噪声方差,信号包络为 $b(t)$.事件 H_0 , H_1 分别代表雷达回波中没有目标和有目标两种情况.检测的目的就是从接收噪声环境 $n(t)$ 中判断目标信号 $s(t)$ 是否存在.

信号的输入信噪比可表示为: $SNR_{in} = b^2/N_0$. 仿照式(8)、(9)的推导,可以得出匹配滤波器最大输出信噪比的表达式:

$$\begin{aligned} SNR_{out} &= \frac{\int_{-T/2}^{T/2} b(t) \exp[j2(f_d t + \frac{1}{2} a t^2)] dt}{N_0 T}^2 \\ &= \frac{b^2}{N_0 T} \int_{-T/2}^{T/2} \exp[j2(f_d t + \frac{1}{2} a t^2)] dt^2 \\ &= \frac{b^2 T}{N_0} |A_0(0, 0, a)|^2 \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $A_0(0, 0, a)$ 是由式(5), (6)定义的归一化单载频矩形脉冲信号的加速度模糊函数.当 a 一定时, $A_0(0, 0, a)$ 是积累时间 T 的函数.可以证明, $SNR_{out} \sim T$ 是一凸函数,存在极大值,此时最佳积累时间 T_{opt} 为:

$$T_{opt} = \sqrt{\frac{2}{a}} \quad (12)$$

可见,在雷达发射信号波长一定的情况下,信号的最佳积累时间与加速度的均方根成反比.因此,对于具有某一恒定加速度的目标而言,并不是信号的相参积累时间 T 越长,输出信号的信噪比就越高,而是存在一个最佳积累时间.当超过最佳积累时间时,输出信噪比反而随积累时间的增加而下降,检测性能也随之下降.这与仅考虑目标匀速运动时的积累检测结论不同.图 3 给出了当目标加速度分别为 $a = 5 \text{ g}, 20 \text{ g}, 80 \text{ g}$ 时匹配滤波器输出信噪比与积累时间的关系,其输出信

噪比极大值对应的最佳积累时间分别为 $T_{opt} = 13.42\text{ms}$, 6.71ms , 3.36ms . 图 4 给出了目标在不同加速度下对应的最佳积累时间.

4 结论

本文首次研究了雷达信号处理中的加速度分辨力和多卜勒匹配滤波器中的加速度容限问题,得到了矩形包络信号波形的加速度分辨力与信号持续积累时间的平方成反比的结论,分析了加速度引起的多卜勒匹配滤波器失配,推导了在这种情况下输出信噪比与相参检测积累时间的约束关系. 这些结论将对雷达信号参数设计和性能分析提供一些非常有益的指导,并且丰富了有关雷达信号分辨力理论的内容. 随着现代雷达面临的目标机动性能进一步加强以及反导作战等应用需求,如何提高目标加速度的估计精度,如何补偿目标加速度造成的检测性能下降等都是有待进一步研究的问题.

参考文献:

- [1] T K Bhattacharya. Time-frequency based detection scheme for missile warning system [A]. IEE radar 97 conference [C]. Edindurg: IEE, 1997. 539 - 543.

- [2] 保铮. 雷达信号的长时间积累 [A]. 第七届全国雷达会议 [C]. 南京:中国电子学会雷达分会,1999.
- [3] P M Woodward. Probability and information theory with application to radar [M]. Oxford:pergamon Press,1953.
- [4] 林茂庸,柯有安. 雷达信号理论 [M]. 北京:国防工业出版社,1984.
- [5] 毛士艺,等. 脉冲多卜勒雷达 [M]. 北京:国防工业出版社,1988.
- [6] Xiang-gen Xia. Discrete Chirp-fourier transform and its aplication to chip rate estimation [J]. IEEE Trans. S. P,2000,48(11):3122 - 3133.

作者简介:

赵宏钟 男,1971 年生于河北省,1993 年毕业于国防科技大学电子工程专业,1999 年获国防科技大学通信与电子工程专业硕士学位,现在国防科技大学攻读电子学与通信专业博士学位,研究兴趣为非稳信号处理、时频分析、时变谱分析等领域,已发表多篇论文.

付 强 男,1963 年生于湖南省,1983 年毕业于国防科技大学电子工程专业,1992 年获国防科技大学通信与电子工程专业硕士学位,现在国防科技大学 ATR 实验室工作,副教授,硕士生导师. 研究兴趣为高速 DSP 信号处理设计、非平稳信号处理等领域,在国内外已发表多篇论文.

电子学报

2003 年第 6 期 Acta Electronica Sinica No. 6 2003

(总期 234 期) (Monthly) (Series No. 234)

主管单位 中国科学技术协会
主办单位 中国电子学会
协办单位 中国计算机报社
编辑 《电子学报》编辑委员会
主 编 王 守 觉
总 编 辑 刘 力
通 信 处 北 京 1 6 5 信 箱
(邮政编码 100036)
电 话 (010)68279116,68285082
传 真 (010)68173796

China Association for Science and Technology
Published by the Chinese Institute of Electronics, Beijing
China Information World
Edited by Editorial Board of Acta Electronica Sinica
Chief Editor: WANG Shou-jue
Director: LIU Li
Add: Editorial Office of Acta Electronica Sinica
(P. O. Box 165, Beijing 100036, China)
Tel: 86-10-68279116, 68285082
Fax: 86-10-68173796

Home page: <http://www.elecjournal.org>; <http://dxu.chinajournal.net.cn>

Email: cje@elecjournal.org; dxu@chinajournal.net.cn

排版印刷 北京育兴达印刷厂
国内总发行 北京市报刊发行局

Printed by Yuxingda, Beijing, China
Distributed by

国外总发行 中国国际图书贸易总公司
国内订购处 全 国 各 邮 电 局

Domestic: Beijing Baokan Faxingju, China
Foreign: China International Book Trading Corporation
Subscription Office — All Local Post Offices in China

刊号: ISSN 0372 - 2112
CN11 - 2087/ TN

邮发代号(国内/ 国外): 2 - 891/ M436

国内定价 20.00

