

距离-速度-加速度联合模糊函数计算：信号动力学表示方法

胡文 刘中 李春彪
(南京理工大学电子工程系 南京 210094)

摘要：该文研究宽带信号距离-速度-加速度联合模糊函数的计算问题。该模糊函数在直接计算时，时间尺度变化的宽带信号计算需要大的运算量，其计算精度直接影响了模糊函数的性能。该文基于信号的动力学系统表示理论，将时间尺度变化宽带信号的产生同动力学系统结合，提出利用动力学系统同步理论的宽带信号距离-速度-加速度联合模糊函数的计算方法。该方法首先通过动力学系统产生时延和时间尺度变化的信号，然后由数字方式计算相关函数，从而获得宽带信号的模糊函数。计算机仿真结果表明，该方法具有运算量小、易于实时操作以及适用于非解析信号等优点。

关键词：信号处理；加速度；宽带信号；模糊函数；混沌信号；时间尺度变化

中图分类号：TN911.7

文献标识码：A

文章编号：1009-5896(2008)11-2670-04

Calculation on Range-Velocity-Acceleration Ambiguous Functions Using Signal Dynamical Representation

Hu Wen Liu Zhong Li Chun-biao

(Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In this paper, the calculation of Range-Velocity-Acceleration Ambiguous Function (RVAAF) of wideband signals is considered. In the direct implementation, the formulation of the time-scaling and time-varying signal takes much computational load and its formulation accuracy affects the AAF performance. By exploiting the generating dynamics of the wideband signal, it is found that the time-delay and time-scaling wideband signal can be generated by a corresponding dynamical system with synchronization techniques. With this observation, the AAF can be calculated by following the conventional correlation method. Numerical simulation shows that the proposed method has little computational load and is suitable for non-analytical signals.

Key words: Signal processing; Acceleration; Wideband signal; Ambiguous function; Chaos signal; Time-scaling varying

1 引言

模糊函数理论是研究雷达信号性能的重要工具，由Woodward于1953年首先提出^[1]。随后，许多学者丰富和发展了模糊函数理论，使其适用于不同的信号形式(如窄带信号模糊函数^[2-4]，宽带信号模糊函数^[5,6]等)。近年来随着对目标加速度特征的研究重视，人们将模糊函数推广到加速度领域^[7]，用于分析雷达信号的加速度性能。但在宽带条件下加速度模糊函数的相关研究鲜见报道。实际上，加速度作为运动目标的一个重要特征，不仅对信号的平稳性、相干性、检测性能、估计性能及方法都产生重要的影响，而且加速度还可以作为一个有效特征用来识别目标的属性、类别，鉴别电子欺骗干扰及假目标信号等^[7]。因此，研究考虑加速度的宽带距离-速度-加速度联合模糊函数(为表达简洁起见，下文简称为宽带加速度联合模糊函数)，将宽带模糊函数的理论推广

到加速度域是一个有价值的工作。

目前已经有大量的方法可用于计算模糊函数^[5,6]，特别是基于FFT的一类高效算法极大地降低了模糊函数的计算量。但现有的模糊函数算法中，大多数是基于窄带信号的假设，在宽带条件下，目标运动引起的信号时间尺度变化不能近似为对信号相位和频率的简单调制，因此难以利用基于FFT的高效算法来对宽带信号进行处理^[5]。于是近年来，有文献^[5,6]提出利用小波算法计算宽带模糊函数。而文献^[8,9]提出了基于同步的算法，用于计算混沌信号的宽带模糊函数。但这些算法只考虑了信号中时间尺度变化量恒定的情况，也就是目标速度假设恒定的情况。而宽带加速度联合模糊函数的计算，就涉及到信号时变的时间尺度变化，现有的宽带模糊函数计算方法^[5,6,8,9]将难以适用。因此设计适用于宽带加速度联合模糊函数的计算方法是本文要研究的主要问题。

实际上，对于可以解析表示的信号，其宽带加速度联合模糊函数可以方便地由定义式直接计算。而无法解析表示的信号，如果可以看作由某个确定性的动力系统产生，就可能通过产生信号的动力系统的特性来得到时间尺度变化后的

2007-05-21 收到，2008-04-21 改回

国家自然科学基金(60472059)和江苏省研究生创新基金(AD20233)资助课题

信号,从而也可方便地计算宽带加速度联合模糊函数。文献[8,9]中已经将这种思想应用于计算信号的宽带模糊函数,本文将扩展这种思想,将其用于计算信号的宽带加速度联合模糊函数。

2 信号模型及加速度模糊函数

假设发射信号为 $s(t)$ 。对点目标而言,其回波信号 $s_r(t)$ 与发射信号关系为^[5]

$$s_r(t) \approx C(t)s(t - \tau(t)) \quad (1)$$

其中 $C(t)$ 为回波强度, $\tau(t)$ 为时延,也就是信号从发射机到目标再返回的往返时间。当目标的径向加速度远小于光速的情况下,考虑加速度影响的目标回波信号 $s_r(t)$ 可表示为^[5]

$$s_r(t) = C(t)s[(\sigma + \sigma_a(t - \tau_0))(t - \tau_0)] \quad (2)$$

其中

$$C(t) = \sqrt{\sigma + 2\sigma_a(t - \tau_0)}, \quad \tau_0 = \frac{2}{c}R_0, \\ \sigma = \frac{c - v_0}{c + v_0}, \quad \sigma_a = \frac{c^2 a}{(c + v_0)^3} \quad (3)$$

式(2)中 τ_0 为信号时延, σ 为多普勒效应引起的信号变时间尺度量, σ_a 为加速度引起的变时间尺度增量, c 为光速, R_0 为目标初始距离, v_0 为目标初始速度, a 为目标加速度。

由式(2)和式(3)可知,回波信号可看作是具有时延和时变时间尺度变化的发射信号,目标的相对位置与运动状态和信号模型中 3 个参数关系如下

$$R_0 = \frac{\tau_0 c}{2}, \quad v_0 = \frac{1 - \sigma}{1 + \sigma} c, \quad a = \frac{8\sigma_a c}{(1 + \sigma)^3} \quad (4)$$

因此可以通过估计回波信号中的参数 τ_0 , σ 和 σ_a 来得到目标参数 R_0 , v_0 和 a 的估计值。需要特别指出的是,根据式(2)和式(3),时延 τ_0 , 多普勒变时间尺度量 σ 和变时间尺度增量 σ_a 与目标距离 R_0 , 目标速度 v_0 和目标加速度 a 有唯一对应的关系,在下文中统称 τ_0 和 R_0 为距离, σ 和 v_0 为速度, σ_a 和 a 为加速度,但在计算时应区分开来。

定义 1 信号波形的宽带距离-速度-加速度联合模糊函数为

$$A(\tau, \sigma, \sigma_a) = \int_{-\infty}^{\infty} C(t)s(t)s^*[(\sigma + \sigma_a(t - \tau))(t - \tau)]dt \quad (5)$$

从式(5)可见,信号波形的宽带距离-速度-加速度联合模糊函数是 3 变量的多维函数,且当 $(\tau, \sigma, \sigma_a) = (0, 1, 0)$, 即距离速度和加速度都完全匹配时, $|A(\tau, \sigma, \sigma_a)|$ 有最大值。其物理意义在于, (τ, σ, σ_a) 远离 $(0, 1, 0)$ 时,函数 $|A(\tau, \sigma, \sigma_a)|$ 的值下降的速率衡量了信号 $s(t)$ 在 τ , σ 和 σ_a 这 3 个域上的分辨率;下降的越快,分辨率越高,反之下降的越缓慢,则分辨率越低。当 $\tau = 0$ 时,宽带距离-速度-加速度联合模糊函数退化为信号的宽带速度-加速度联合模糊函数:

$$A(0, \sigma, \sigma_a) = \int_{-\infty}^{\infty} C(t)s(t)s^*[(\sigma + \sigma_a t)t]dt \quad (6)$$

当 $\tau = 0$ 和 $\sigma = 1$ 时,宽带距离-速度-加速度联合模糊函数退化为信号的宽带加速度模糊函数:

$$A(0, 1, \sigma_a) = \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{1 + 2\sigma_a t} |s(t)s^*(\sigma_a t^2)| dt \quad (7)$$

同样,分别令 $\sigma = 1$, $\sigma_a = 0$, 可以得到信号的宽带距离-加速度联合模糊函数 $A(\tau, 1, \sigma_a)$ 和宽带距离-速度联合模糊函数 $A(\tau, \sigma, 0)$ 。

3 基于信号动力系统表示的宽带加速度联合模糊函数的计算方法

3.1 基于信号动力系统表示的变时间尺度信号产生算法

从式(2)、式(3)和式(4)中可见,目标的位置和运动参数 R_0 , v_0 和 a 与回波信号 $s_r(t)$ 中的参数 τ_0 , σ 和 σ_a 有一一对应的映射关系。如果信号 $s(t)$ 和 $s_r(t)$ 都能看作某一微分动力系统的输出^[10],那么信号的参数必然与相应系统的参数相联系,于是便能建立目标参数与相应动力系统参数之间的关系。在此基础上,能通过估计系统的参数来得到目标参数的估计,或者可以通过构造特定的系统来得到参考信号,以改善匹配滤波器的增益,文献[8,9]中将这种思想应用于计算信号的宽带模糊函数。本节的目的就是在文献[8,9]思想的基础上进一步发展,阐述目标的速度和加速度参数与系统参数的联系。

设两个信号 $s(t)$ 和 $s_r(t)$ 是以下两个动力系统的解

$$\dot{x} = F(x) \quad (8)$$

$$\dot{y} = (\sigma + 2\sigma_a t)F(y) \quad (9)$$

其中 $F: R^n \mapsto R^n$ 是一连续的函数, $x, y \in R^n$ 是状态变量, \dot{x} 和 \dot{y} 分别表示 x 和 y 对时间的一阶导数。设 $s(t) = h(x(t))$ 和 $s_r(t) = \sqrt{\sigma + 2\sigma_a t} |h(y(t))|$ 分别为式(8)和式(9)的输出信号,其中 $h(\cdot)$ 为观察函数, $\sigma + 2\sigma_a t$ 是时间尺度参数,其中 σ 和 σ_a 都为常数。当雷达目标的速度小于光速 c , 系统工作时间定义在 $t \in [0, T)$, 可以得到限制条件 $T < \sigma(1 + \sigma)^2 / 4\sigma_a$, $\sigma > 0$ 。假设系统式(8)在初始值为 $x(0)$ 时的解为 $x(t)$, 那么系统式(9)在初始值 $y(0) = x(0)$ 时的解为

$$y(t) = x((\sigma + \sigma_a t)t) \quad (10)$$

对比式(2)与式(10),可以得到

$$s_r(t) = \sqrt{\sigma + 2\sigma_a t} |h(y(t))| = \sqrt{\sigma + 2\sigma_a t} |s((\sigma + \sigma_a t)t)| \quad (11)$$

这就是说,如果发射信号 $s(t)$ 由系统式(8)产生,那么回波信号 $s_r(t)$ 可以看作动力系统式(9)产生的输出。因此,可以通过估计系统参数估计目标参数;或通过构造与信号 $s(t)$ 对应的系统式(9),直接产生其变时间尺度信号用于相关处理。

3.2 宽带加速度联合模糊函数计算算法

由式(10)和式(11),式(5)中定义的信号 $s(t)$ 的宽带加速度联合模糊函数可以直接被计算,图 1 说明其在特定 (τ, σ, σ_a) 下的计算方法。首先构造式(8)表示的动力系统 1,使信号 $s(t)$ 看作初始值为 x_0 的系统 1 产生的输出。其次由式(9)构造系统 2。那么根据上式(10)和式(11),以 $t = \tau$ 为起始时间,并以 $y(\tau) = x_0$ 为初始值的系统 2 产生信号 $s_r(t) = C(t)s((\sigma + \sigma_a(t - \tau))(t - \tau))$ 。最后,两路信号进行相关处理,可实现任意 (τ, σ, σ_a) 时,信号 $s(t)$ 的宽带加速度联合模糊函

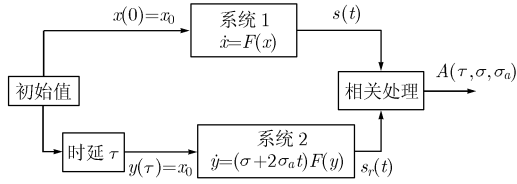


图1 计算宽带距离-速度-加速度联合模糊函数式的框图

数。

这种算法的优势在于，图1中系统1产生的信号 $s(t)$ 的时间尺度变化信号 $s((\sigma + \sigma_a(t - \tau))(t - \tau))$ 由系统2直接产生，也就是由模拟方式构造式(9)所描述的系统。如文献[5,6]所述，即使当 $\sigma_a = 0$ 和 $\tau = 0$ 时，从无法解析表示的信号 $s(t)$ 中得到 $s(\sigma(t - \tau))$ 亦是一个难题，现有方法都需要极大的运算负担^[5]，而 $\sigma_a \neq 0$ 时， $s((\sigma + \sigma_a(t - \tau))(t - \tau))$ 的获得显然需要更为庞大的计算量，且目前没有见到相关的研究报告。本文提出的算法中，图1中系统2可以由模拟系统实现，因此避免了由数字方法产生 $s((\sigma + \sigma_a(t - \tau))(t - \tau))$ 需要极大运算量的问题。

需要注意的是，实际动力系统的初始值往往难以直接设置，因此本节的理论在实际操作时需要与同步技术相结合，这方面的思想在文献[8,9]中已有一些阐述。利用脉冲同步产生时间尺度变化信号的方法分为3个步骤。首先，预先对系统式(8)产生的信号 $x(t)$ 进行采样，得到序列 $x(k\Delta t), k = 1, \dots, n$ 并存储于缓存器。然后，在需要产生时间尺度变化信号时，缓存在时刻 $(\sqrt{\sigma^2 + 4\sigma_a k\Delta t} - \sigma) / 2\sigma_a, k = 1, \dots, n$ 输出原数据。最后，输出的数据由脉冲耦合的方式作用于系统式(9)，在满足脉冲同步的条件下^[9]，同步后的系统式(9)将输出时间尺度变化后的信号 $s_r(t) = C(t)s((\sigma + \sigma_a(t - \tau))(t - \tau))$ 。关于利用脉冲同步产生时间尺度变化信号的更详细阐述参见文献[9]。

4 仿真分析

混沌信号作为典型的宽带信号，由于其极好的自相关性、类似于噪声的伪随机特性和易于产生与控制的特性，受到了通信和雷达领域研究人员的广泛重视^[11-13]。作为不能解析表示的信号，混沌信号的宽带加速度联合模糊函数用传统方法难以计算，因为信号的变时间尺度操作虽然理论上可以由基于多速率的算法插值实现，但需要极大的运算量^[14]。这里我们可利用第2节的方法计算。下面以蔡氏电路产生的混沌信号为例进行说明，产生蔡氏混沌信号的系统可由如下方程表示

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= 10k(x_2 - x_1 - f(x_1)) \\ \dot{x}_2 &= k(x_1 - x_2 + x_3) \\ \dot{x}_3 &= -15kx_2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中

$$f(x) = bx + 0.5(a - b)(|x + 1| - |x - 1|)$$

并且 $(a, b) = (-1.3, -0.85)$ 是非线性部分的参数， k 是一常量参数，用于控制系统的时间尺度。当初始值 $(x_1(0), x_2(0), x_3(0)) = (-0.0443, -0.5972, 0.0004)$ 时，系统式(12)将产生典型的蔡氏混沌信号 $s(t) = x_1(t)$ 。由系统式(8)和系统式(9)解的关系，时间尺度变化后的信号 $s((\sigma + \sigma_a t)t)$ 可由以下系统产生

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}_1 &= 10k(\sigma + 2\sigma_a t)(y_2 - y_1 - f(y_1)) \\ \dot{y}_2 &= k(\sigma + 2\sigma_a t)(y_1 - y_2 + y_3) \\ \dot{y}_3 &= -15k(\sigma + 2\sigma_a t)y_2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中初始值 $(y_1(0), y_2(0), y_3(0)) = (-0.0443, -0.5972, 0.0004)$ ，输出信号 $s_r(t) = \sqrt{\sigma + 2\sigma_a t}y_1(t) = C(t)s((\sigma + \sigma_a t)t)$ 。

由3.2节所述的算法，可以利用系统式(12)和系统式(13)来计算式(5)定义的蔡氏混沌信号 $s(t)$ 的宽带加速度联合模糊函数。由于实际应用和计算中，信号都是有限长度，设信号 $s(t)$ 为

$$s(t) = \begin{cases} x_1(t), & 0 < t < T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

其中 T 为信号持续时间长度，仿真中参数设置为 $k = 1000, T = 1$ 。仿真结果显示在图2中，其中图2(a)，图2(b)和图2(c)分别是蔡氏混沌信号的宽带速度-加速度联合模糊函数，宽带距离-加速度联合模糊函数和宽带距离-速度联合模糊函数。且图2中第1列为基于动力系统信号表述算法得到的结果，第2列则由传统的基于多速率的算法得到。仿真结果表明，对于不能解析表示的信号，本文提出的方法能精确地计算式(5)定义的宽带加速度联合模糊函数。

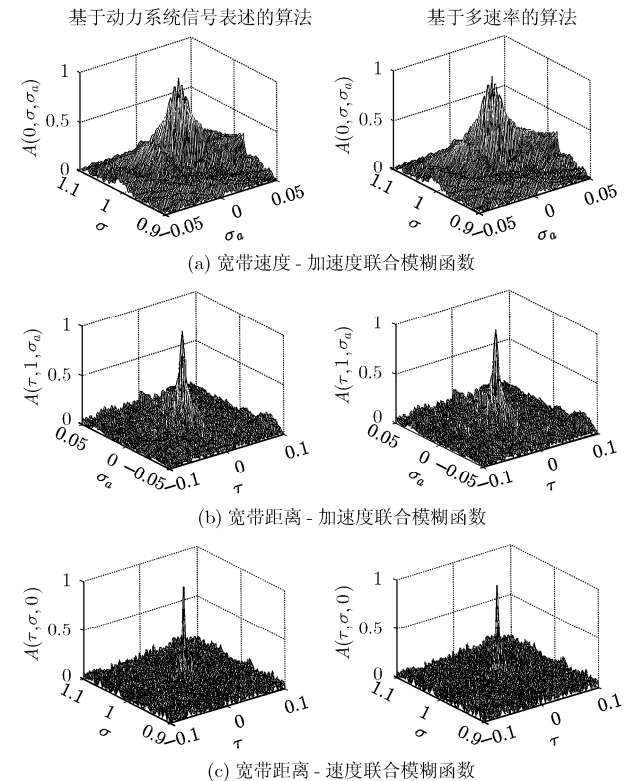


图2 蔡氏混沌信号

本文提出的算法由两部分组成:产生时间尺度变化信号和相关运算。其中第 1 部分由模拟方式实现,第 2 部分相关运算如果由数字方式实现,那么此模拟-数字混合系统的运算量由数字实现的相关算法决定。基于多速率的算法也由插值产生时间尺度变化信号和相关运算组成,且在数字插值得到时间尺度变化信号时需要极大的运算量。因此,对比于根据定义基于多速率插值的算法,本文提出的方法在运算量上有明显的优势。而两种算法在理想情况下都能准确地计算宽带加速度联合模糊函数,实际操作中,基于多速率的算法其精确度取决于插值运算的精度,而本文提出的算法其精确度取决于系统式(9)产生的时间尺度变化信号的误差。在由模拟系统实现时,这种误差由系统的参数误差、初始值误差和噪声干扰共同决定。如果采用类似文献[8,9]的同步算法进行改进,那么产生时间尺度变化信号的误差将由实际系统的同步误差决定。

5 结束语

本文提出了考虑加速度的宽带加速度联合模糊函数。基于动力系统参数与信号参数的关系,提出了宽带信号加速度联合模糊函数的计算方法。以蔡氏混沌信号为例仿真计算了宽带加速度联合模糊函数。本文为定量的计算和分析宽带雷达信号的加速度参数估计性能,评价宽带条件下加速度对雷达信号处理的影响提供了客观依据。值得注意的是,本文提出的宽带信号加速度模糊函数算法,在用于混沌信号时只在短时间内有效。这是由混沌系统的初值敏感性决定的,也就是初始值的极小误差都将引起长时间后的极大误差。可能的解决方法是利用类似文献^[8,9]阐述的混沌同步技术,这方面的内容限于篇幅本文不再赘述。

参 考 文 献

- [1] Woodward P. Theory of radar information. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1953, 1(1): 108-113.
- [2] Stein S. Algorithms for ambiguity function processing. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1981, ASP-29(3): 588-599.
- [3] Tsao T, Slamani M, Varshney P, Weiner D, Schwarzlander H, and Borek S. Ambiguity function for a bistatic radar. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, 33(3): 1041-1051.
- [4] Auslander L and Tolimieri R. Characterizing the radar ambiguity functions. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1984, 30(6): 832-836.
- [5] Weiss L G. Wavelets and wideband correlation processing. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1994, 11(1): 13-32.
- [6] Niu X X, Ching P C, and Chan Y T. Wavelet based approach for joint time delay and Doppler stretch measurements. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 1111-1119.
- [7] 赵宏钟, 付强. 雷达信号的加速度分辨性能分析. *中国科学(E辑)*, 2003, 33(7): 638-646.
- [8] Hu W, Liu Z, and Li C B. A synchronization-based algorithm for calculating the wideband Auto/cross ambiguity functions of chaotic signal. Proceedings of 2006 CIE International Conference on Radar, Shanghai, 2007, 1: 288-291.
- [9] Hu W, Liu Z, and Li C B. A synchronization-based scheme for calculating ambiguity functions of wideband chaotic signals. *IEEE Trans. on AES*, 2008, 44(1): 400-406.
- [10] Zayezdny A and Druckmann I. A new method of signal description and its applications to signal processing. *Signal Processing*, 1991, 22(2): 153-178.
- [11] Carroll T L. Chaotic system for self-synchronizing Doppler measurement. *Chaos*, 2005, 15(1): 1-5.
- [12] Venkatasubramanian V and Leung H. A novel chaos-based high-resolution imaging technique and its application to through-the-wall imaging. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, 12(7): 528-531.
- [13] Liu Z, Zhu X H, and Hu W, et al. Principles of chaotic signal radars. *Int. J. Bifur. Chaos*, 2007, 17(1): 1735-1739.
- [14] Crochiere R E and Rabiner L R. Multirate Digital Signal Processing. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1983: 115-141.

胡 文: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为混沌动力学在雷达中的应用.

刘 中: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事混沌与信息动力学、信号分析与处理和雷达与通信技术的教学与研究工作.

李春彪: 男, 1971 年生, 讲师, 博士生, 研究方向为高分辨力成像技术与混沌雷达.