

随机调相连续信号的模糊函数特性及在医学超声成像上的应用前景探讨

费保蔚 庄天戈 (上海交通大学生物医学工程研究所·200031)
卞正中 程敬之 (西安交通大学生物医学工程系·710049)

传统的脉冲式医用超声成像系统的模糊函数由于存在周期性的速度模糊和距离模糊,影响了图像的质量和分辨力。本文借鉴噪声雷达理论,证明了随机调相连续波信号具有最优的模糊函数特性,并据此提出了随机调相医用超声成像系统的设计思想。这一思想的提出为克服速度模糊和距离模糊,提高图像质量和分辨力,设计新一代医用超声成像系统提供了理论依据。

关键词: 模糊函数, 随机调相, 医用超声, 成像系统

The ambiguity function properties of continuous random phase-modulated signal and its application in medical ultrasonic imaging

FEI Baowei, ZHUANG Tiange

(Biomedical Engineering Institute Shanghai Jiaotong University · 200031)

BIAN zhengzhong, CHENG Jingzhi

(Biomedical Engineering Institute Xian Jiaotong University · 710049)

In traditional pulse medical ultrasonic imaging system, the ambiguity function has periodic distance ambiguity and velocity ambiguity, this affects the image quality and resolution. By using radar theory, this paper has proved that the continuous random phase-modulated signal has the optimum ambiguity function, and has put forward the design ideology of random phase-modulated medical ultrasonic imaging system. This method is the theory basis of overcoming the distance ambiguity and velocity ambiguity, improving the image quality and resolution and designing new generation medical ultrasonic imaging system.

Keywords: ambiguity function, phase-modulated, medical ultrasonic, imaging system

1 引言

在现代噪声雷达理论中,模糊函数是对雷达信号进行分析、研究和设计的有效工具,也是分析和比较系统性能优劣的重要手段。模糊函数由雷达发射波形和滤波器特性决定。通过它可以研究雷达采用何种发射波形及处理滤波后,整个系统将具有什么样的分

辨力、模糊度、测量精度及杂波抑制能力。雷达理论和医用超声成像系统理论具有很多相似的地方。例如,相控阵医用超声成像系统的理论原型就是相控阵雷达理论。在传统的脉冲式雷达系统中,系统的发射波形是一系列的脉冲串信号,系统的模糊函数呈“钉板”型。系统存在周期性的速度模糊和距离模糊^[1]。传统的脉冲式医用超声成像系统与传统的脉

* 收稿日期: 1996-5-21; 修回日期: 1996-7-15

冲式雷达系统相似, 系统的模糊函数同样存在周期性的速度模糊和距离模糊, 影响了图像的质量和分辨力。本文根据噪声雷达理论, 证明了随机调相连续波信号具有最优的模糊函数特性, 并据此提出了随机调相医用超声成像系统的设计思想。这一思想的提出为克服速度模糊和距离模糊, 提高图像质量和分辨力, 设计新一代医用超声成像系统提供了理论依据。^[2]

2 随机调相连续波信号的平均模糊函数的定义及特性^[2~7]

据美国 Purdue 大学的 G. R. Cooper 所给的定义, 我们来讨论随机调相连续波信号的平均模糊函数。^[2] 设发射信号被波形 $x(t)$ $\bar{\Psi}(t)$ 调制, 平均模糊函数的定义为:

$$A(\tau, \varphi) = k^2 E \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{x}(t) \bar{\Psi}(t) x^*(t - \tau) \bar{\Psi}^*(t - \tau) \exp(-j2\pi\varphi t) dt \right\} \quad (1)$$

其中 k^2 为标准化常数, $\bar{W}(t)$ 为描述相关器的观察时间, E 为期望算子, $\bar{\quad}$ 表示解析, $*$ 表示复数共轭。当 $\bar{x}(t)$ 与 $\bar{\Psi}(t)$ 相互独立时:

$$A(\tau, \varphi) = k^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E \left[\bar{x}(t_1) \bar{x}^*(t_2) \bar{\Psi}^*(t_1 - \tau) \bar{\Psi}(t_2 - \tau) \right] \cdot E \left[\bar{\Psi}(t_1) \bar{\Psi}^*(t_2) \bar{\Psi}^*(t_1 - \tau) \bar{\Psi}(t_2 - \tau) \right] \bar{W}(t_1) \bar{W}^*(t_2) \exp[-j2\pi\varphi \cdot (t_1 - t_2)] dt_1 dt_2 \quad (2)$$

因而, 随机信号的平均模糊函数不仅取决于 $\bar{x}(t) \bar{\Psi}(t)$, 也取决于 $\bar{W}(t)$ 。如果发射信号的复包络定义为:

$$\bar{x}(t) = 1, \quad \bar{\Psi}(t) = \exp\{-j\theta(t)\} \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式中得:

$$A(\tau, \varphi) = k^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E \left\{ \exp\{j\theta(t_2) - j\theta(t_2 - \tau) - j\theta(t_1) + j\theta(t_1 - \tau)\} \right\} \cdot \bar{W}(t) \bar{W}^*(t) \cdot \exp[-j2\pi\varphi \cdot (t_1 - t_2)] dt_1 dt_2 \quad (4)$$

设 $V_n(t)$ 是零均值噪声电压, 而且是平稳的正态随机过程, 对于调相, 我们得:

$$\theta(t)_{\Phi M} = D\theta V_n(t) \quad (5)$$

其中 $D\theta$ 是每单位电压所对应的角度, 单位为弧度每伏。令 $u_1 = \theta(t_2)_{\Phi M} = D\theta V_n(t_2)$, $u_2 = \theta(t_2 - \tau)_{\Phi M} = D\theta V_n(t_2 - \tau)$, $u_3 = \theta(t_1)_{\Phi M} = D\theta V_n(t_1)$, $u_4 = \theta(t_1 - \tau)_{\Phi M} = D\theta V_n(t_1 - \tau)$ 则有:

$$E \left\{ \exp\{j\theta(t_2) - j\theta(t_2 - \tau) - j\theta(t_1) + j\theta(t_1 - \tau)\} \right\} = E \left\{ \exp\{ju_1 - ju_2 - ju_3 + ju_4\} \right\} = \Phi_u(j\xi) = \exp\{-\bar{\xi} k_u \xi / 2\} \quad (6)$$

其中 $\Phi_u(j\xi)$ 是 u 的四维特征函数, k_u 是 u 的四维协方差阵, $\bar{\xi}$ 是 ξ 的转移矩阵。

$$\xi = [\xi_1 \quad \xi_2 \quad \xi_3 \quad \xi_4]^T \quad (7)$$

$$\bar{\xi} = [\xi_1 \quad \xi_2 \quad \xi_3 \quad \xi_4] \quad (8)$$

$$k_u = \begin{bmatrix} \overline{u_1^2} & \overline{u_1 u_2} & \overline{u_1 u_3} & \overline{u_1 u_4} \\ \overline{u_2 u_1} & \overline{u_2^2} & \overline{u_2 u_3} & \overline{u_2 u_4} \\ \overline{u_3 u_1} & \overline{u_3 u_2} & \overline{u_3^2} & \overline{u_3 u_4} \\ \overline{u_4 u_1} & \overline{u_4 u_2} & \overline{u_4 u_3} & \overline{u_4^2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中: $\xi_1 = \xi_4 = 1$, $\xi_2 = \xi_3 = -1$

$$\begin{aligned} \overline{u_1^2} &= R\theta(0) & \overline{u_1 u_2} &= R\theta(\tau) \\ \overline{u_1 u_3} &= R\theta(t_1 - t_2) & \overline{u_1 u_4} &= R\theta(t_1 - t_2 - \tau) \\ \overline{u_2 u_1} &= R\theta(\tau) & \overline{u_2^2} &= R\theta(0) \\ \overline{u_2 u_3} &= R\theta(t_1 - t_2 + \tau) & \overline{u_2 u_4} &= R\theta(t_1 - t_2) \\ \overline{u_3 u_1} &= R\theta(t_1 - t_2) & \overline{u_3 u_2} &= R\theta(t_1 - t_2 + \tau) \\ \overline{u_3^2} &= R\theta(0) & \overline{u_3 u_4} &= R\theta(\tau) \\ \overline{u_4 u_1} &= R\theta(t_1 - t_2 - \tau) & \overline{u_4 u_2} &= R\theta(t_1 - t_2) \\ \overline{u_4 u_3} &= R\theta(\tau) & \overline{u_4^2} &= R\theta(0) \end{aligned} \quad (10)$$

则(6)式可表示为:

$$\begin{aligned} \Phi_u(j\xi) &= \exp\{-\bar{\xi} k_u \xi / 2\} \\ &= \exp\{-\sum_{i,j=1}^4 k_{uij} \xi_i \xi_j / 2\} \\ &= \exp\{2R\theta(\tau) - 2R\theta(0) + 2R\theta(t_1 - t_2) - R\theta(t_1 - t_2 + \tau) - R\theta(t_1 - t_2 - \tau)\} \quad (11) \end{aligned}$$

由(6)式及(11)式, (4)式可变为:

$$A(\tau, \varphi) = k^2 \exp\{2\{R\theta(\tau) - R\theta(0)\}\} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\{2R\theta(t_1 - t_2) - R\theta(t_1 - t_2 + \tau) - R\theta(t_1 - t_2 - \tau)\} \cdot \bar{W}(t_1) \bar{W}^*(t_2) \cdot \exp[-j2\pi\varphi \cdot (t_1 - t_2)] dt_1 dt_2$$

$$= k^2 \exp[2\{R_\theta(\tau) - R_\theta(0)\}] \cdot H(\tau, \varphi)^2 \quad (12)$$

其中:

$$H(\tau, \varphi)^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\{2R_\theta(t_1 - t_2) - R_\theta(t_1 - t_2 + \tau) - R_\theta(t_1 - t_2 - \tau)\} \cdot \overline{W}(t_1) \overline{W}^*(t_2) \exp[-j2\pi\varphi \cdot (t_1 - t_2)] dt_1 dt_2 \quad (13)$$

随机调相连续波信号的平均模糊函数 $A(\tau, \varphi)$ 近似“图钉”型, 如图 1 所示。这一理想的模糊函数在原点处呈现一针状的高峰, 在原点以外的地方均匀地小。因为在原点 $\tau=0, \varphi=0$ 表明两个目标在距离和径向速度上都没有差别, 用系统来分别时将无法区别。当 $\tau \neq 0, \varphi \neq 0$ 时, 模糊函数的值比在原点时为小, 能够区别两个目标的距离和径向速度。 τ 和 φ 稍一偏离原点, $A(\tau, \varphi)$ 就比 $A(0, 0)$ 小得多, 它的距离和径向速度分辨力都很高。

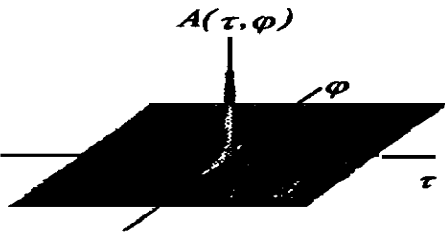


图 1 随机调相连续波信号的平均模糊函数

3 随机调相医用超声成像系统的设计思想

根据上面的分析可知, 随机调相连续波信号具有理想的“图钉”型模糊函数, 因而具有很好的距离和速度分辨力^[1]。这种理论已成功应用于噪声雷达中^[2], 利用现代数字信号处理技术如自适应滤波, 该系统非常成功地应用到现代军事领域, 借鉴噪声雷达理论, 我们可以将该技术应用到现代医用超声成像系统中。

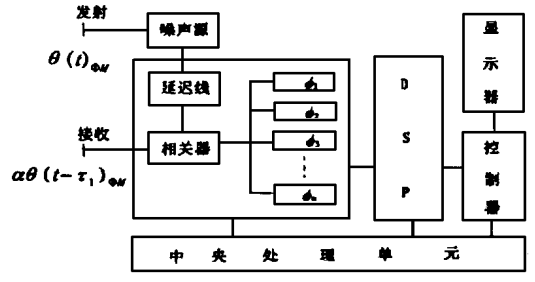


图 2 随机调相医用超声成像系统的原理框图

图 2 为系统的原理框图, 发射的是噪声源产生的随机信号 $\theta(t)_{\Phi M}$, 它是一个均值为零的平稳随机过程。接收的是回波信号 $\alpha\theta(t - \tau_i)_{\Phi M}$, τ_i 为目标延迟, $n(t)$ 为内外部噪声, 于是接收信号为:

$$\theta(t)_{\Phi M} = \alpha\theta(t - \tau_i)_{\Phi M} + n(t) \quad (14)$$

接收信号与基准发射信号的互相关函数为:

$$R_{\theta\theta}(\tau) = E[\alpha\theta(t - \tau)_{\Phi M}\theta(t)_{\Phi M}] \quad (15)$$

式中 $E[\]$ 表示对时间取平均。

采用相关法使回波信号与基准的发射信号具有复共轭的关系, 使互相关函数 $R_{\theta\theta}(\tau)$ 的峰值和自相关函数 $R_{\theta\theta}(\tau - \tau_i)$ 的峰值相吻合。 $R_{\theta\theta}(\tau - \tau_i)$ 在 $\tau = \tau_i$ 时为最大点, 依此最大值就确定了目标的距离。

当目标有径向运动时, 互相关函数 $R_{\theta\theta}(\tau)$ 的高频分量会产生多普勒频移, 因此目标能够根据多普勒频移分选出来。如图 2 中的相关器内用一组关联的多普勒频率滤波器与活动目标产生的多普勒频移相匹配。这样在两维(距离和速度)都匹配时相当于模糊函数 $A(\tau, \varphi)$ 取最大值, 即 $A(0, 0)$ 位置。将获得的信号经过数字信号处理器实时处理后送监视器成像。

4 结 语

通过上面的讨论可知, 随机调相医用超声成像系统由于其最优的模糊函数特性, 在图像质量和分辨等方面将大大优于传统的脉冲式医用超声成像系统。随着计算机技术及

(下转 93 页)

从试验记录及其分析结果可以看到: 模拟的 3 亮点回波信号时延间隔明显且随不同的方位距离变化, 信号均落入一定的接收波束宽度范围内并产生相对应的声程差, 即是说模拟多亮点回波信号能使多波束探测设备

表 1 模拟目标尺度分析处理结果

定点	亮点	收发时延(ms)	固定时延(ms)	实际时延(ms)	回波距离(m)	波束宽度(°)	模拟目标尺度(m)	相对误差(%)
1	A	138	6.12	131.88	95.61	23	38.11	4.7
	B	121	6.12	114.88	83.29			
	C	109	6.12	102.88	74.59			
2	A	158	4.15	153.85	111.54	23	45.44	13.6
	B	147	4.15	142.85	103.57			
	C	128	4.15	123.85	89.79			
3	A	87	5.65	81.35	58.98	30	36.46	8.9
	B	95	5.65	89.35	64.78			
	C	108	5.65	102.35	74.2			
4	A	92	5.47	86.53	62.73	26	35.4	11.5
	B	100	5.47	94.53	68.53			
	C	114	5.47	108.53	78.68			
5	A	215	12.5	202.5	146.81	5	38.96	2.6
	B	240	12.5	227.5	164.94			
	C	265	12.5	252.5	183.06			
6	A	210	12.16	197.84	143.43	5	44.39	10.9
	B	242.5	12.16	230.34	167.0			
	C	268	12.16	255.84	185.48			
7	A	214	12.31	201.69	146.23	5	38.26	4.4
	B	238	12.31	225.69	163.63			
	C	263	12.31	250.69	181.75			
8	A	161	11.96	149.04	108.06	10	32.89	17.8
	B	179	11.96	167.04	121.1			
	C	196	11.96	184.04	133.43			
9	A	175	11.14	163.86	118.8	10	40.12	0
	B	195	11.14	183.86	133.3			
	C	220	11.14	208.86	151.4			
10	A	138	1.0	137	93.53	20	37.93	5.2
	B	140	1.0	139	91.71			
	C	142	1.0	141	95.7			

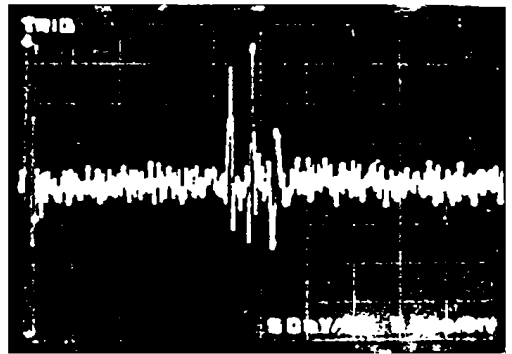


图 3 多亮点回波测量记录波形(定点 5) 获得接收信号声程差及波束宽度, 从而能判别出具有一定精度的模拟目标尺度, 因此硬件系统达到了预期的模拟目标尺度的目的。

3 结束语

利用潜艇声学亮点特性模拟其目标尺度是目标特性模拟技术的主要内容之一, 其在潜艇模拟器、主动拖曳声呐、鱼雷声靶等方面有着广泛的应用前景。本文所作的研究仅仅是个开始, 其初步模拟研究了目标的静态尺度。对目标的动态尺度模拟, 则是今后需作广泛深入研究的新的内容。

参考文献

- 1 汤渭霖. 声呐目标回波的亮点模型. 声学学报, 1994; 19: 92~100
- 2 朱 堃. 主动声呐检测信息原理. 海洋出版社, 1990; 258~265
- 3 陈春玉、王玉洲. 目标尺度精估技术. 舰船设备科学与技术, 1995; 1: 4~6.

(上接 82 页)

大规模高速集成电路技术的发展, 利用现代数字信号处理技术, 随机调相医用超声成像系统将成为现实。目前还未见采用该方法而进行医用超声实时成像的报导。

参考文献

- 1 蔡希尧. 雷达系统概论. 科学出版社. 1983.
- 2 刘国岁. 随机信号理论与应用. 兵器工业出版社, 1992.
- 3 Cooper G. R., Gassner R.L. Analysis of a

wideband random signal radar system, Purdue University, TR-EE 66~9, August 1966.

4 Woodqard P. M., Radar ambiguity analysis. Feb. 1967(AD653404).

5 Remley G. R., Doppler dispersion effects in matched filter detection and resolution. Proc. of the IEEE, 1966; 54(1)

6 Kaveh M., Cooper G.R. Average ambiguity function for a randomly staggered pulse sequence. IEEE Trans., 1976; AES~12(3)

7 Speiser J. M Wide-band ambiguity function. IEEE Trans., 1967; IT 13(1)