

# 分裂波束双通道方位走向的空间模糊问题

汪 新<sup>1</sup>, 王明洲<sup>2</sup>, 李 忠<sup>1</sup>

(1. 广东湛江 91388 部队, 广东湛江 524022; 2. 中国船舶重工集团公司第 705 研究所, 西安 710075)

**摘要:** 目标回波的空间方位走向是重要的目标空间特性, 其特性和特征是水下体目标识别的重要依据。讨论了基于分裂波束双通道方位走向方法目标尺度识别中的方位走向的扩展特性, 给出了目标走向的理论统计趋势结果。进一步给出了分裂波束双通道方位走向的空间视角扩展的模糊范围。同时讨论了不同发射信号形式和参数对目标尺度张角模糊范围的影响。结果表明: 短 CW 脉冲和 LFM 发射信号形式下, 目标尺度方位扩展角模糊程度要小于长 CW 脉冲发射信号形式下的目标方位扩展角模糊程度, 识别舷角范围增大。

**关键词:** 目标尺度; 方位序列走向; 视角扩展模糊

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-04-0290-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.04.007

## On spatial ambiguity of bearing trend based on splitting dual beamforming channels

WANG Xin<sup>1</sup>, WANG Ming-zhou<sup>2</sup>, LI Zhong<sup>1</sup>

(1. Unit 91388 of PLA, Zhanjiang 554022, Guangdong, China; 2. The 705 Research Institute, Shipbuilding Industry Corporation, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** The feature of bearing trend, which is the most important spatial characteristic of target-echo, is of importance to underwater target recognition. In this paper the problem about bearing trend based on splitting dual channels is discussed at first, and the theoretical result of bearing trend is deduced. Furthermore, the ambiguity of visual angle expanding based on splitting dual channels is presented, and the effects of different transmission signal types and parameters on the ambiguity of visual angle expanding are discussed. It is shown that ambiguity of target length expanding angle for short CW and LFM pulses is smaller than that for long CW pulse, and the range of recognition angle is enlarged.

**Key words:** target length; bearings series trend; ambiguity of visual angle expanding

## 0 概述

水下主动目标的尺度识别主要基于分裂波束双通道方位走向的方法。分裂波束双通道系统能够在一定的信噪比下完成点源目标的定向<sup>[1,2]</sup>, 对于体目标回波, 由于在目标回波的短时间内有多个反射亮点子回波叠加, 从而造成分裂波束双通道鉴向得到的方位是一个合成等效方位, 同时也会引起目标的部分扩展角变得模糊<sup>[3-5]</sup>。

本文详细地讨论了基于分裂波束双通道方位走向空间方位的模糊性, 研究了 CW 和 LFM 发射信号形式下, 不同距离、舷角情况的目标扩展角估计值的模糊性, 给出了进行目标识别所需发射信号

形式和识别的舷角扇面范围。

## 1 空间多反射点下的双子阵鉴向等效方位序列分析

设空间中有两个反射点, 距离为  $\Delta l$ 。在距两反射点为  $r_1$ 、 $r_2$  处有一个双子阵基阵, 两子阵阵距为  $d$ , 其相对几何关系如图 1 所示。

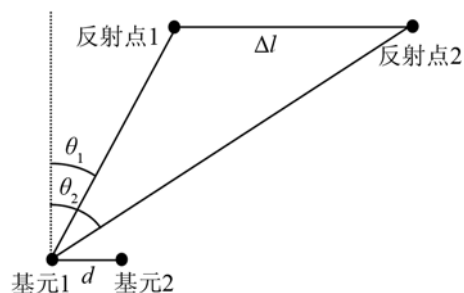


图 1 反射点位置与基阵双子阵相对空间关系示意图

Fig.1 The spatial relationship between reflection point and the two sub-arrays

收稿日期: 2012-09-30; 修回日期: 2012-12-31

作者简介: 汪新(1971—), 男, 河南信阳人, 工程师, 研究方向为水声测量技术。

通讯作者: 汪新, E-mail: xinwang\_1971@163.com

设脉宽为  $T$  的发射信号为  $S(t)$ <sup>[4]</sup>:

$$S(t) = \begin{cases} \cos \omega_0 t, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

则两子阵接收回波分别为  $e_1(t)$  和  $e_2(t)$ :

$$\begin{cases} e_1(t) = a_1 S(t - \tau_1) + a_2 S(t - \tau_2) = \sum_{i=1}^2 a_i S(t - \tau_i) \\ e_2(t) = a_1 S(t - \tau_1) e^{j\varphi_1} + a_2 S(t - \tau_2) e^{j\varphi_2} = \sum_{i=1}^2 a_i S(t - \tau_i) e^{j\varphi_i} \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $a_1$  和  $a_2$  分别为两反射点反射强度,  $\tau_1$  和  $\tau_2$  为发射信号  $S(t)$  经反射点 1 和 2 到基元 1 的时延,  $\varphi_1$  为基元 1 和基元 2 接收的反射点 1 信号的相位差,  $\varphi_2$  为基元 1 和基元 2 接收的反射点 2 信号的相位差, 平面波条件下  $\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_1$ ,  $\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_2$ 。进一步写成:

$$\begin{cases} e_1(t) = a_1 \cos[\omega_0(t - \tau_1)] + a_2 \cos[\omega_0(t - \tau_2)] = \\ \sum_{i=1}^2 a_i \cos[\omega_0(t - \tau_i)] \\ e_2(t) = a_1 \cos[\omega_0(t - \tau_1) + \varphi_1] + a_2 \cos[\omega_0(t - \tau_2) + \varphi_2] = \\ \sum_{i=1}^2 a_i \cos[\omega_0(t - \tau_i) + \varphi_i] \end{cases} \quad (3)$$

对于回波中两个反射点子回波在时间上重叠的时间段而言, 进一步整理得到:

$$\begin{cases} e_1(t) = \sqrt{D_1^2 + D_2^2} \sin(\omega_0 t + \Phi_1) \\ e_2(t) = \sqrt{D_3^2 + D_4^2} \sin(\omega_0 t + \Phi_2) \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} D_1 &= a_1 \sin \omega_0 \tau_1 + a_2 \sin \omega_0 \tau_2 = \sum_{i=1}^2 a_i \sin \omega_0 \tau_i \\ D_2 &= a_1 \cos \omega_0 \tau_1 + a_2 \cos \omega_0 \tau_2 = \sum_{i=1}^2 a_i \cos \omega_0 \tau_i \\ D_3 &= a_1 \sin(\omega_0 \tau_1 - \varphi_1) + a_2 \sin(\omega_0 \tau_2 - \varphi_2) = \\ &\sum_{i=1}^2 a_i \sin(\omega_0 \tau_i - \varphi_i) \\ D_4 &= a_1 \cos(\omega_0 \tau_1 - \varphi_1) + a_2 \cos(\omega_0 \tau_2 - \varphi_2) = \\ &\sum_{i=1}^2 a_i \cos(\omega_0 \tau_i - \varphi_i) \end{aligned}$$

$\Phi_1$ 、 $\Phi_2$  分别为两子阵接收回波  $e_1(t)$  和  $e_2(t)$  的初始相位, 且

$$\text{tg } \Phi_1 = \frac{D_2}{D_1}, \quad \text{tg } \Phi_2 = \frac{D_4}{D_3}$$

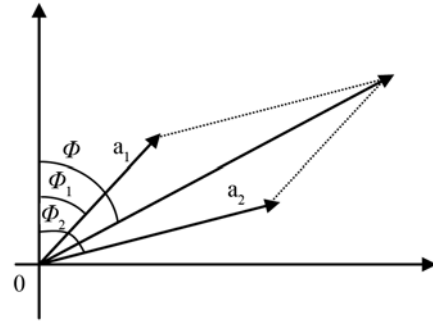
由式(4)可见, 两个接收通道相位差  $\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$  为:

$$\text{tg } \Phi = \text{tg}(\Phi_2 - \Phi_1) = \frac{a_1^2 \sin \varphi_1 + a_2^2 \sin \varphi_2 + 2a_1 a_2 \sin\left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \cos\left(\omega_0 \Delta \tau + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right)}{a_1^2 \cos \varphi_1 + a_2^2 \cos \varphi_2 + 2a_1 a_2 \sin\left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \cos\left(\omega_0 \Delta \tau + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right)} \quad (5)$$

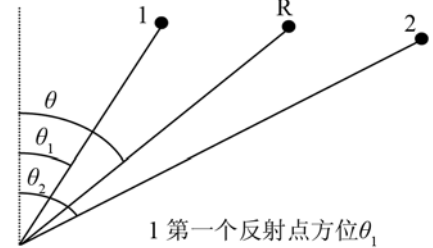
其中:  $\Delta \tau = \tau_2 - \tau_1$ 。

$$\text{tg } \Phi = \text{tg}(\Phi_2 - \Phi_1) = \frac{a_1 \sin \varphi_1 + a_2 \sin \varphi_2}{a_1 \cos \varphi_1 + a_2 \cos \varphi_2} = \frac{\sum_{i=1}^2 a_i \sin \varphi_i}{\sum_{i=1}^2 a_i \cos \varphi_i} \quad (6)$$

由式(4)可得两通道相位差满足图 2(a)所示的矢量关系, 其对应方位角满足图 2(b)所示的矢量关系。



(a)



1 第一个反射点方位  $\theta_1$   
2 第二个反射点方位  $\theta_2$   
R 表示等效视在方位  $\theta$

(b)

图 2 两个基元接收回波相位  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$  按平行四边形矢量合成等效空间相位  $\Phi$  的示意图

Fig.2 The equivalent phase  $\Phi$  formed by the parallelogram rule for receiving echo phase  $\Phi_1$  of sub-array 1 and the phase  $\Phi_2$  of sub-array 2

由图 2 可见, 如果  $\Phi_1 \leq \Phi_2$ , 则有式(7):

$$\Phi_1 \leq \Phi \leq \Phi_2 \quad (7)$$

进而有

$$\sin \theta_1 \leq \sin \theta \leq \sin \theta_2 \quad (8)$$

其中  $\theta$  为等效视在方位, 当  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  方位在  $0 \sim 90^\circ$  范围内, 有

$$\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (9)$$

式(9)表明, 等效视在方位应在真实反射点方位  $\theta_1$  与  $\theta_2$  之间。

对于多反射点下的二子阵鉴相等效方位序列, 可推广到第  $m$  个子回波开始对总回波贡献时, 可得等效二子阵鉴向下的等效视在相位  $\Phi_m (m=1, 2, \dots, N)$ :

$$\text{tg } \Phi_m = \frac{\sum_{i=1}^m a_i \sin \varphi_i}{\sum_{i=1}^m a_i \cos \varphi_i} \quad (10)$$

由矢量合成原理易知:

$$\Phi_1 \leq \Phi_2 \leq \Phi_3 \leq \dots \leq \Phi_{N-1} \leq \Phi_N \quad (11)$$

同样, 对等效视在方位序列  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N-1}, \theta_N$ , 根据式(10)有:

$$\begin{aligned} \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_1 \leq \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_2 \leq \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_3 \leq \dots \\ \leq \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_{N-1} \leq \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_N \end{aligned} \quad (12)$$

即有:

$$\sin \theta_1 \leq \sin \theta_2 \leq \sin \theta_3 \leq \dots \leq \sin \theta_{N-1} \leq \sin \theta_N \quad (13)$$

对于  $\theta_i$  在  $0^\circ \sim 90^\circ$  之间, 有:

$$\theta_1 \leq \theta_2 \leq \theta_3 \leq \dots \leq \theta_{N-1} \leq \theta_N \quad (14)$$

由于在实际体目标情况下, 式(13)中的等号不可能同时成立, 所以目标仍存在尺度张角  $\Delta\theta = \theta_N - \theta_1$ 。

由上述证明得到的式(14)表明: 尽管由于体目标回波各反射点可能在时间上相互重叠, 使得双通道鉴向的等效视在方位不在真实的几何方位上, 但其方向序列同时向一边偏移, 这样目标的张角信息仍然存在于目标回波之中, 即目标尺度张角信息仍然存在。对双通道鉴向系统而言, 这是目标尺度的一个重要不变特征。但是目标张角尺度信息相对于真实的几何目标张角信息而言, 是存在一定的损失和模糊的。

## 2 分裂波束双通道方位走向的空间模糊

由以上讨论可见, 目标空间尺度(扩展)信息的模糊损失主要在目标回波的开始附近和结束附近。根据文献[6], 在发射 CW 信号且脉宽为  $T$  时, 目标回波在开始时, 子回波相互叠加造成的空间目标长度最大损失  $l_{e1}$  为

$$l_{e1} = \frac{cT}{4|\cos q|} \quad (15)$$

式中:  $q$  为攻击目标舷角, 其水平面示意图如 3 所示。

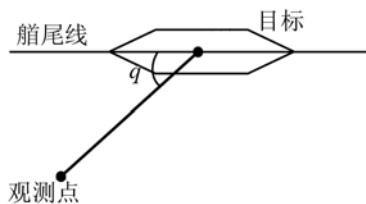


图 3 攻击目标舷角  $q$  示意图  
Fig.3 Attacking angle  $q$

同样, 在目标回波结束时附近, 造成的目标长度最大损失  $l_{e2}$  为

$$l_{e2} = \frac{cT}{4|\cos q|} \quad (16)$$

故目标总的空间模糊长度  $l_e$  为

$$l_{e1} + l_{e2} = \frac{cT}{2|\cos q|} \quad (17)$$

这样, 对于实际真实几何长度为  $l$  的目标, 经双通道鉴相而得到的等效目标长度为  $l_e = l - l_e$ 。所以目标的视在张角  $\Delta\theta$  可由等效目标长度  $l_e$  和阵与目标距离  $r$  得到:

$$r_1 = \sqrt{r^2 + \frac{l_e^2}{4} - r l_e |\cos q|} \quad (18)$$

$$r_2 = \sqrt{r^2 + \frac{l_e^2}{4} + r l_e |\cos q|} \quad (19)$$

$$\Delta\theta = \cos^{-1} \left( \frac{r_1^2 + r_2^2 - l_e^2}{2r_1 r_2} \right) \quad (20)$$

其中,  $r_1, r_2$  分别表示最大视在张角下, 目标距离  $l_e$  两端的距离。在距目标较近时, 由于目标扩展角较大, 扩展角  $\Delta\theta$  的模糊对目标尺度信息的存在与否影响较小, 而在较远时, 则  $\Delta\theta$  信息的模糊对目标尺度信息的存在与否的判断影响较大。在目标距基阵相对远一些 ( $r > 3l$ ) 时, 也可采用如下的近似:

$$\Delta\theta = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{l_e}{r} |\sin q| \quad (21)$$

由式(18)、(19)可见, 方位走向与目标的等效长度、舷角和距离有关, 同时等效长度  $l_e$  与发射信号脉宽又有密切关系。

## 3 发射信号形式对目标尺度方位扩展角模糊的影响

由上面给出的结果, 可进行发射信号形式对目标尺度方位扩展角模糊的影响的讨论。图 4~6 给出了实际目标长度  $l=100\text{m}$ , 目标距离为 900、800、700、600、500、400、300、200、100m 时, 不同的发射信号形式和脉宽情况下, 目标方位扩展角和舷角的关系。由下至上的九条曲线分别对于基阵与目标间距离为 900、800、700、600、500、400、300、200、100m。

图 4~6 表明: 在发射信号形式一定, 同样舷角情况下, 距离近时可估计的目标方位扩展角要大于远距离时目标方位扩展角; 发射短 CW 信号时在一定距离情况下, 目标方位扩展角要大于发射长 CW 信号时的目标方位扩展角, 并且短 CW 信号对应的可识别目标方位扩展角范围要大于长 CW 信号情况; 发射同样脉宽情况下, LFM 信号形式情况下的目标方位扩展角要比 CW 信号形式下的目标方位扩

展角大，并且舷角范围也有所增大。

以上说明在短 CW 脉冲和 LFM 发射信号形式下，目标尺度方位扩展角模糊程度要小于长 CW 脉冲发射信号形式下的目标方位扩展角模糊程度，同时意味着识别舷角范围的增大。

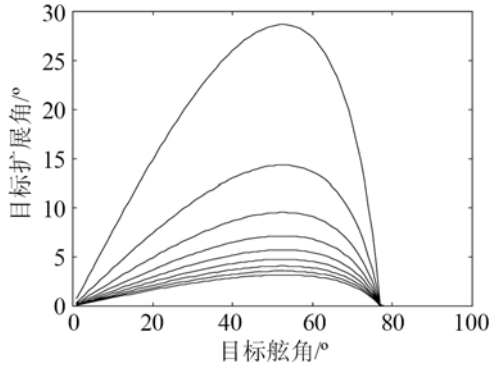


图 4 发射信号为 CW 形式, 脉宽 50ms 情况下目标方位扩展角与舷角关系曲线

Fig.4 The relationship between target bearing expanding angle and port angle (transmitting signal: CW; pulse width: 50 ms)

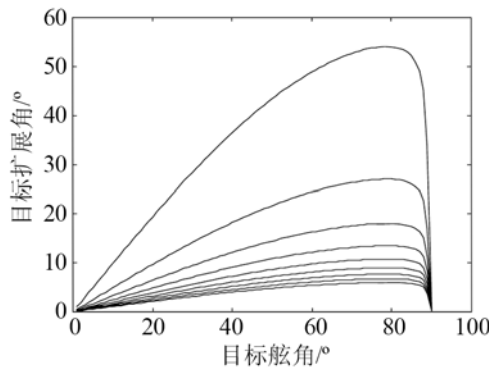


图 5 发射信号 CW 形式, 脉宽 2ms 情况下目标方位扩展角与舷角关系曲线

Fig.5 The relationship between target bearing expanding angle and port angle (transmitting signal: CW; pulse width: 2 ms)

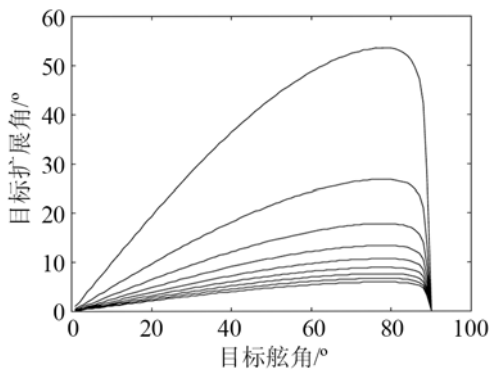


图 6 发射信号 LFM 形式, 脉宽 50ms, 调频宽度 0.8kHz, 目标方位扩展角与舷角关系曲线

Fig.6 The relationship between target bearing expanding angle and port angle (transmitting signal: LFM; pulse width: 50 ms; FM width: 0.8kHz)

### 4 结 语

本文讨论了由于大尺度目标的多个回波叠加所造成的双通道视在方位的变化规律，从理论上证明了即使在多回波相互叠加的情况下目标扩展角信息仍然存在。同时指出了目标扩展角的空间模糊性，并给出了在空间模糊情况下理论公式及目标扩展角的变化规律，即：短 CW 脉冲和 LFM 发射信号形式下，目标尺度方位扩展角模糊程度要小于长 CW 脉冲发射信号形式下的目标方位扩展角模糊程度，识别舷角范围增大。

### 参 考 文 献

- [1] 郑兆宁, 向大威. 水声信号被动检测与参数估计理论[M]. 北京: 科学出版社, 1982.  
ZHENG Zhaoning, XIANG Dawei. Underwater acoustic modeling and estimation[M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [2] 侯自强. 声纳信号处理[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.  
HOU Ziqiang. Sonar signal processing[M]. Beijing: Ocean Press, 1986.
- [3] Michael Scott Campbell. Real-time sonar classification for autonomous underwater vehicles[D]. Master's dissertation, Naval Postgraduate School, Monterey, 1996.
- [4] 王明洲, 郝重阳, 黄晓文. 基于相关法方位分析的水下主动目标尺度识别研究[J]. 西北工业大学学报, 2003, 21(3): 317-320.  
WANG Mingzhou, Hao Chongyang, Huang Xiaowen. On underwater target dimension recognition based on bearings analysis of signal correlation feature[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University. 2003, 21(3): 317-320.
- [5] 刘朝晖, 李志舜, 马国强, 等. 基于分形的 BP 网络水下目标识别[J]. 海军航空工程学院学报, 2004, 19(5): 554-558.  
LIU Zhaohui, LI Zhisun, MA Guoqiang, et al. Underwater target recognition based on fractal feature[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2004, 19(5): 554-558.
- [6] 王明洲. 数字式水下目标识别技术研究[D]. 北京: 中国舰船研究院学位论文, 1999.  
WANG Mingzhou. Research of digital underwater target recognition technology[D]. Beijing: Degree Thesis of China Ship Research Institute, 1999.