

基于信号能量累积序列的多传感器水声 多目标关联

吴培荣^{1,2}, 陆佺人¹, 冷志敏¹

(1. 东南大学信息科学与工程学院, 南京 210096; 2. 上海船舶电子设备研究所, 上海 201108)

摘要: 讨论利用接收水声信号的能量累积信息进行多传感器多目标数据关联, 采用极性相关方法分析能量累积信息的变化特性, 从而得到不同传感器间的多目标关联性检验准则。以声纳接收信号为对象的仿真实验表明, 由所提方法计算的判别函数在同源目标和非同源目标间有明显的可分性, 且在较低信噪比条件下, 该方法仍可得到较好的关联效果。

关键词: 多传感器; 水声; 多目标; 能量累积; 极性相关; 数据关联

中图分类号: O426.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-04-0541-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.04.023

A correlation approach of multi-sensor underwater acoustic multi-target based on energy trace

WU Pei-rong^{1,2}, LU Ji-ren¹, LENG Zhi-min¹

(1. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: An approach to data association by using the energy trace of underwater acoustic signal is proposed in this paper. The variety of energy trace is analyzed by exploiting the polar correlation rule. And a decision criterion for the correlation of multi-sensor and multi-target is derived. The simulation results of sonar-received signals demonstrate that the decision function proposed in this paper can effectively distinguish targets between identical and non-identical acoustics sources. The approach is still effective even if the signal-to-noise ratio (SNR) is low.

Key words: multi-sensor; underwater acoustic; multi-target; energy accumulation; polar correlation; data association

1 引言

多传感器多目标信息融合的研究, 一直都是各个领域尤其是国防领域中的一个重要研究课题^[1-3], 而其中一个非常重要的内容就是多目标数据关联问题。由于单传感器有时提供的目标信息量并不是很充分, 因此需要多个传感器协同工作来扩大传感器测量区域半径和提高目标发现的能力, 然而, 如果多个传感器在其共同的测量区域内检测到多个目标, 那么就必须对这些目标信息进行相关性处理, 使得最终能够判断出多传感器测量信息中哪些信息量对应着同一个目标。对于被动声纳这一类较难获取目标距离信息的多传感器探测问题, 基于目

标方位信息^[4,5]和频谱特征差异^[6]的数据关联方法是目前最为常用的数据关联方法。一般而言, 基于多目标方位信息的关联方法, 能够获取的目标信息量较少, 使得目标间的关联比较复杂和困难; 而基于目标信号时频特征分析的关联方法, 在目标信号受到较强干扰情况下, 会因频谱的畸变而使关联性下降。

本文利用目标信号的能量累积来分析水下被动多阵声纳多目标之间的数据关联问题, 通过对信号能量累积信息的相关性检验来判断各传感器检测的多目标之间是否存在关联, 对能量累积信息随时间的变化采用了极性相关的分析处理方法, 并进行了实验仿真, 取得了预期的结果。该方法为多传感器多目标之间的关联分析提供了一种有效的途径。

2 能量累积信息

不失一般性, 本文以双传感器模型为分析基

收稿日期: 2009-01-20; 修回日期: 2009-03-25

作者简介: 吴培荣(1964-), 男, 浙江人, 博士研究生, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 吴培荣, E-Mail: pprwu@sina.com

础,如图1所示。假定两传感器具有相同的检测能力,它们的采样频率相同且接收目标的信息量也为同一类型。目标噪声在水下传播的过程中受到吸收衰减和扩展衰减的作用,在许多声纳工作频率和作用距离范围内,一般以扩展衰减为主,因此本文仅考虑扩展衰减作用,同时考虑背景噪声污染的影响。

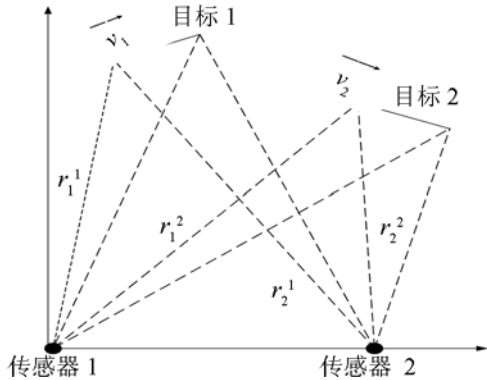


图1 双传感器分析模型

Fig.1 Two sensors and two targets model

假定目标辐射噪声信号为 $s(t)$, 目标和传感器之间距离为 $r(t)$, 背景噪声为 $n(t)$, 则在仅考虑球面扩展近似前提下, 传感器 i 接收到 j 个目标的信号 $x_i^j(t)$ 形式如下^[7]:

$$x_i^j(t) = \frac{1}{r_i^j(t)} s^j(t) + n_i^j(t) \quad i=1,2 \quad j=1,2,\dots,num_i \quad (1)$$

上式中 num_i 为传感器 i 测得的目标数目, j 为传感器测得的目标编号数。 $n_i^j(t)$ 为传感器 i 接收 j 个目标信号时所受到的背景噪声干扰, 假设为服从均值为零、方差为 σ^2 的高斯白噪声, 各目标辐射噪声之间及目标辐射噪声与背景噪声之间相互独立。

一般来说目标与传感器相距较远, 那么在短时间 $[t_1, t_2]$ 之内, 比如 1s 的采样时间长度, 目标的运动距离远小于目标和传感器之间距离。所以, 在这段时间之内计算能量累积值时可以认为目标和传感器之间的距离基本保持不变。

因此, 在较短采样时间间隔 $[t_1, t_2]$ 内, 传感器 i 接收 j 个目标信号的能量累积量为:

$$E_i^j(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} [x_i^j(t)]^2 dt = \left(\frac{1}{r_i^j}\right)^2 \int_{t_1}^{t_2} [s_i^j(t)]^2 dt + \frac{2}{r_i^j} \int_{t_1}^{t_2} s_i^j(t) n_i^j(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} [n_i^j(t)]^2 dt \quad (2)$$

式(2)中第一项对应目标辐射噪声的能量累积量, 第二项由于目标辐射噪声和背景噪声间独立性而为零, 第三项则根据背景噪声为平稳白色和各态历经性假设可近似为 $\sigma^2(t_2 - t_1)$, 由此, 式(2)可化简为:

$$E_i^j(t_1, t_2) = \left(\frac{1}{r_i^j}\right)^2 \int_{t_1}^{t_2} [s_i^j(t)]^2 dt + \sigma^2(t_2 - t_1) \quad (3)$$

在整个观测时间段内可定义能量累积序列为:

$$E_i^j = \{E_i^j(1), E_i^j(2), \dots, E_i^j(N)\} \quad i=1,2 \quad j=1,2,\dots,n_i \quad (4)$$

其中 $N = T/t_gap$, T 为观测总时间, t_gap 为每次能量累积的积分时间。

这样可以通过对能量累积量的变化分析, 用以判断多传感器测得的多个目标之间是否存在关联, 即是否为同源目标。从式(3)中可以看到, 在能量累积的过程中, 噪声部分的能量在各个时间段内只受积分时间长短的影响, 因此式(3)中仅第一项直接反映着声纳系统接收的目标辐射噪声能量的变化, 对目标间的关联产生有效作用。

图2为某声纳实际接收的两个目标辐射噪声信号能量累积曲线, 变化趋势上存在明显的差异。图3为仿真的空间不同位置处两传感器阵接收的同源目标辐射噪声信号能量变化曲线, 虽然其总体变化趋势不同, 但其细节变化具有明显的相似性。

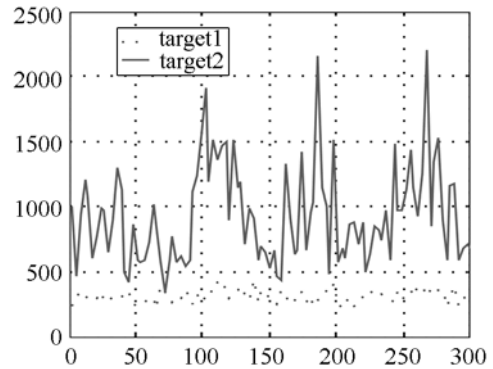


图2 某声纳接收的两目标信号能量累积

Fig.2 Energy traces of signals of two targets received by one sensor

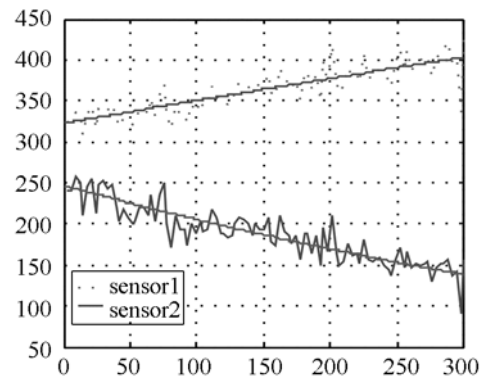


图3 两传感器测得的同源目标能量累积

Fig.3 Energy traces of signals of one target received by two sensors

实际上目标信号的能量变化主要受两种因素的影响, 一是因目标运动引起目标与传感器间距离变化, 二是信号本身能量的随机变化。前者由目标信号能量曲线中的缓变部分反映, 后者则由目标信号能量曲线中的快变化过程反映。对于同源目标, 后者具有相似性。这样, 接收端的目标辐射噪声累

积能量变化可以看成是目标辐射噪声能量随机变化(快变化部分)受到目标距离因子(慢变化部分)的调制, 可写为:

$$E(t) = A(r, t)E(s, t) \quad (5)$$

其中 $A(r, t)$ 为一慢变化的距离因子, $E(s, t)$ 为目标辐射噪声自身的随机能量, 用全微分形式表示能量 $E(t)$ 的变化, 有:

$$\Delta E(t) = A(r, t)\Delta E(s, t) + E(s, t)\Delta A(r, t) \quad (6)$$

其中 $\Delta E(t)$ 为接收信号的能量变化, $\Delta E(s, t)$ 为目标辐射噪声的随机能量变化, 由于距离因子 $A(r, t)$ 是慢变化部分, 其变化 $\Delta A(r, t)$ 较 $\Delta E(s, t)$ 是个小量, 忽略不计, 所以, $\Delta E(t)$ 主要反映了目标辐射噪声能量随机变化的信息。

3 极性相关分析

为了消除 $\Delta E(t)$ 中 $A(r, t)$ 因子的影响, 本文采用极性相关分析方法以提取其中的快变化信息。对于产生的能量累积序列, 按式(7)定义生成新的能量累积 0-1 关联序列, 即当后一时刻能量累积大于前一个时刻的累积值时, 则定义产生的序列值为 1, 反之为 0。

$$\delta_i^j(k) = \begin{cases} 1 & E_i^j(k+1) - E_i^j(k) \geq 0 \\ 0 & E_i^j(k+1) - E_i^j(k) < 0 \end{cases} \quad k=1, 2, \dots, N-1 \quad (7)$$

这样可以获得一个新的二值序列 $\delta_i^j = \{\delta_i^j(1), \delta_i^j(2), \dots, \delta_i^j(N-1)\}$, 本文称其为能量变化极性信号。该极性信号 δ_i^j 主要反映了快变化的目标辐射噪声能量变化信息, 可以作为目标之间的关联性判决依据。

定义由传感器 1 和 k 获取的极性信号差值序列:

$$\Delta_{ik} = \text{abs}(\delta_i^m - \delta_k^n) \quad (8)$$

显然, 如果两个传感器分别测得的目标 m 和目标 n 为同源目标, 上述的差值序列在理想情况之下应该为一个全 0 序列, 否则, 当目标 m 和目标 n 为非同源目标时, 差值序列中会有较多的非 0 值。因此, 差值序列中 0 的比例数表征了目标间的关联性。当然, 在实际过程中由于信号在传输过程中会受到噪声的干扰而发生一定程度的畸变, 使得两传感器获得的能量累积变化曲线在部分时刻不一定能完全保持一致, 从而导致部分差值序列输出为 1。但只要信号采样的总时间足够长, 那么当两传感器测得的目标相关时, 该差值序列中 1 的个数在差值序列中的比例应该较小。

设置门限值 γ_{gate} , 则有:

$$\begin{cases} p_0 \geq \gamma_{gate} & \text{传感器 } l \text{ 测得目标 } m \text{ 和另一} \\ & \text{传感器 } k \text{ 测得目标 } n \text{ 关联} \\ p_0 < \gamma_{gate} & \text{传感器 } l \text{ 测得目标 } m \text{ 和另一} \\ & \text{传感器 } k \text{ 测得目标 } n \text{ 不关联} \end{cases} \quad (9)$$

其中 p_0 为差值序列中 0 的比例数。

也可以通过计算极性信号 δ_i^j 的相关系数作为关联性的检验量。

$$\rho_{ik}^{jl} = \frac{E\{[\delta_i^j - E\{\delta_i^j\}][\delta_k^l - E\{\delta_k^l\}]\}}{\sqrt{\text{var}(\delta_i^j)}\sqrt{\text{var}(\delta_k^l)}} = \frac{E\{\delta_i^j \delta_k^l\} - E\{\delta_i^j\}E\{\delta_k^l\}}{\sqrt{\text{var}(\delta_i^j)}\sqrt{\text{var}(\delta_k^l)}} \quad (10)$$

4 仿真实验

为检验上述算法和分析的正确性, 对两传感器两目标情况进行如下仿真试验。假设两传感器间距 10km, 每隔 0.5s 进行一次能量累积的计算。两目标初始位置分别为 $[-14350, 17200]$ 和 $[9741, 8254]$, 速度分别为 22kn 和 24kn, 航向分别为 264° 和 175° 。传感器 1 接收的两个目标的信噪比分别为 5.645dB 和 10.551dB, 传感器 2 接收的两个目标的信噪比分别为 3.175dB 和 10.980dB。仿真结果如图 4~7。

其中图 4 为传感器 1 中目标 1(记 T1/S1, 下同)分别与传感器 2 中测量的两个目标间极性信号差值序列的 0、1 分布图, 图 5 为传感器 1 中目标 2(记 T2/S1, 下同)分别与传感器 2 中测量的两个目标间极性信号差值序列的 0、1 分布图, 其对应 0 的比例数 p_0 统计见表 1(表中 T1/S1, T1/S2 表示传感器 1 中目标 1 与传感器 2 中目标 1, 其余类推)。可见, 即使对信噪比较低的目标, 同源目标极性信号差值序列中 0 的比例数也大于 0.8, 而非同源目标极性信号差值序列中 0 的比例数一般都在 0.5 左右波动。

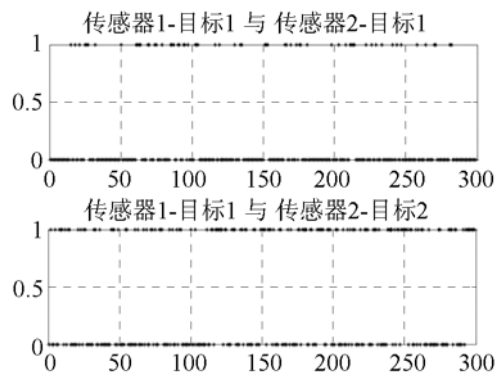


图4 传感器 1 中目标 1 关联 0、1 分布图

Fig.4 0, 1 distribution of the signal association result for the signal of target 1 received by sensor 1

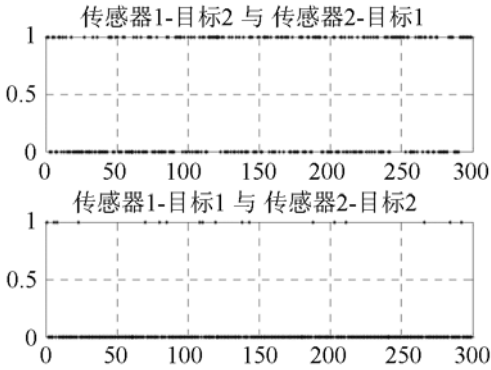


图5 传感器1中目标2关联0、1分布图
Fig.5 0, 1 distribution of the signal association result for the signal of target 2 received by sensor 1

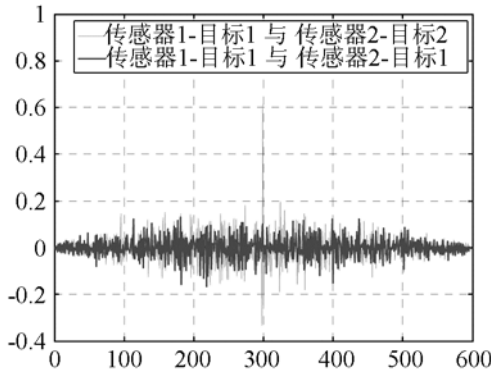


图6 传感器1中目标1关联相关序列
Fig.6 Correlation sequence of the signal association result for the signal of target 1 received by sensor 1

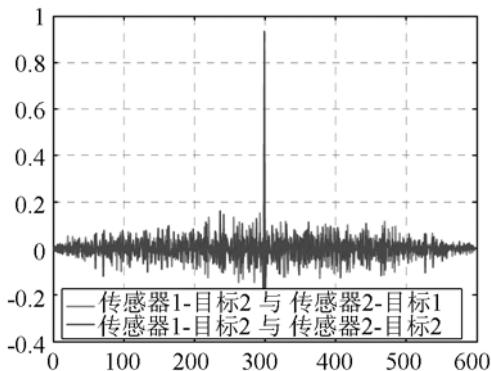


图7 传感器1中目标2关联相关序列
Fig.7 Correlation sequence of the signal association result for the signal of target 2 received by sensor 1

表 1 p_0 值
Table 1 Value of p_0

p_0			
T1/S1,T1/S2	T1/S1,T2/S2	T2/S1,T1/S2	T2/S1,T2/S2
0.8060	0.5017	0.5084	0.9666

图6为传感器1中目标1分别与传感器2中测量的两个目标间极性信号的相关函数图,图7为传感器1中目标2分别与传感器2中测量的两个目标间极性信号的相关函数图,各相关峰的具体数值见

表2。结果表明,当为同源目标时,相关函数中将出现明显的相关峰。

表 2 相关系数
Table 2 Correlation

相关系数			
T1/S1,T1/S2	T1/S1,T2/S2	T2/S1,T1/S2	T2/S1,T2/S2
0.6121	0.1508	0.1922	0.9329

5 结束语

本文主要研究了利用能量累积方法来分析多传感器多目标数据关联的算法,充分挖掘多传感器多目标之间的能量变化信息,采用极性相关处理方法来分析不同传感器之间目标信号的关联,实验仿真结果表明了此种方法在信噪比较低条件之下,依然有较好的关联分析结果。因此这一方法可以为目标间的关联性提供证据支持,在水声多传感器多目标系统的关联分析中有较好的应用前景。

参 考 文 献

[1] 何友,王国宏,彭应宁. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
HE You, WANG Guohong, PENG Yingning. Multi-sensor Information Fusion With Applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry 2000.

[2] 刘同明,夏祖勋,解洪成. 数据融合技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
LIU Tongming, XIA Zuxun, XIE Hongcheng. Data fusion technique and its application[M]. Beijing: Defence Industry Press, 1998.

[3] 方世良,陈宇昕. D-S 数据融合方法在被动声纳目标识别中的应用[J]. 声学技术, 1999, 18(增刊): 89-90.
FANG Shiliang and CHEN Yuxin, Application of D-S data fusion method in target identification for passive sonar[J]. Technical acoustics, 1999, 18: 89-90.

[4] Robert L. Popp, Krishna R. Pattipati, Yaakov Bar-Shalom. m-Best S-D Assignment Algorithm with Application to Multitarget Tracking[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2001, 37(1): 63-66.

[5] Chen L, Tokuda N. Multitarget Tracking By Distributed Cooperative Processing[J]. The International Institute for Advanced Studies in Systems Research and Cybernetics, University of Windsor, Canada, 1999. 232-235.

[6] 张昕. 水声目标迹特征的提取及其在目标分类识别中的应用[D]. 东南大学硕士论文, 2003.
ZHANG Xin. Trace character extraction of underwater acoustic signal and its application in target classification and identification[D]. Nanjing, thesis for the Master, Southeast China University, 2003.

[7] 【美】R. J. Urick. Principles of Underwater[M]. 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990.
R. J. Urick. Principles of Underwater(in Chinese)[M]. Harbin: Harbin Ship Engineering College Press, 1990.