

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.05.024

低截获主动声纳信号特征研究

魏玉华¹, 关成彬², 刘磊¹

(1. 海军驻北京地区武备配套军事代表室, 北京 100082; 2. 海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 为正确设计低截获主动声纳的信号, 在推导声纳截获概率因子方程的基础上, 对低截获主动声纳信号, 从低频、大时宽带宽积、复合码制、随机或非线性、时频捷变、能量效率等 6 个角度分析了信号的特征。结果表明, 采用低频、宽带、符合编码脉冲串信号以及低功率发射是提高主动声纳低截获性能的重要手段。

关键词: 低截获主动声纳; 截获概率因子方程; 信号特征

中图分类号: TP306 **文献标识码:** A

Research on Signal Characteristics of Low Interception Active Sonar

WEI Yu-hua¹, GUAN Cheng-bin², LIU Lei¹

(1. Military Representatives Office of Navy in Beijing Supplying Appendix for Weapon Equipment, Beijing 100082, China; 2. College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To design signal of low interception active sonar exactly, on the basis of derive sonar interception probability factor equation, signal characteristics are analyzed from the view of low frequency, large BT product, compound code, random or nonlinear, cross section of time-frequency and energy ratio. The results demonstrate that main means of enhancing low probability of interception performance of active sonar are that signals with characteristics of low frequencies, wide brands, coded pulse chain and low power transmission ratio.

Keywords: Low interception active sonar; Equation of interception probability factor; Signal characteristics

0 引言

随着主动侦察和主动通信声纳的大量使用, 一方面增加了对安静型潜艇的检测概率和舰艇间水下通信的距离, 另一方面也增加了被敌人发现的概率。如何更有效地发现敌舰和 underwater 通信的同时又能有效地隐藏自己, 不仅关系到舰艇的隐身性能和作战能力, 而且还影响着全舰乃至整个舰艇编队的生存。

低截获 (Low Probability of Interception, LPI) 技术, 是在抗干扰雷达中提出的, 1983 年, J.R.Forest 发表了“低截获概率雷达技术”, 提出了低截获概率方程。随后, 雷达界对低截获概率雷达技术进行了广泛的探索和研究, 取得了许多理论和技术上的突破^[1]。在国内, 低截获概率雷达和通信方面的研究和应用也取得了很大进展^[2]。但在声纳中特别是在主动声纳侦察探测领域, 一直没有得到相应发展。这主要是因为水声信道的特殊性, 使得主动声纳的相干检测性能远不如雷达, 检测尚且不足, 更谈不上低截获。自上世纪九十年代初以来, 西方一些发达国家就开始将低截获技术逐步应用到声纳领域中, 特别是在低截获信号设计和接收系统设计等方面有一定的突破, 总体上说, 有关低截获主动声纳

的研究在国内外都才刚刚起步^[3]。故在推导了声纳截获概率因子方程的基础上, 对低截获主动声纳信号进行分析。

1 声纳截获概率因子方程

声纳截获概率因子可定义为:

$$\alpha = R_I / R_D \quad (1)$$

式中: R_I 为声纳截获接收机能发现 LPI 发射信号的最大距离; R_D 为主动声纳能够探测的最大距离。

根据声纳方程, 声纳截获接收机的优质因素可以写为:

$$FOM_I = TL(R_I) = SL_I - NL_I + GS_I + GT_I - DT_I \quad (2)$$

式中: TL 为传播损失, SL 为声源级, NL 为环境噪声, GS 为空间增益, GT 为时间增益, DT 为检测阈。

单基地声纳, 低截获声纳接收机的优质因素可以写为:

$$FOM_D = TL(R_D) = (SL_D + TS_D - NL_D + GS_D + GT_D - DT_D) / 2 \quad (3)$$

收稿日期: 2009-12-24; 修回日期: 2010-02-04

基金资助: 国家部委基金资助项目(4010501010104)

作者简介: 魏玉华 (1966-), 男, 山东人, 本科, 高级工程师, 从事水声通信与质量监督研究。

假设:

$$SL_I = SL_D = SL, NL_I = NL_D = NL$$

如果截获接收机和接收机的检测阈根据低截获的定义满足 $DT_I / DT_D = \rho$ (ρ 是由战术需求确定的检测阈比例) 的条件下, 综合式 (2)、式 (3) 可得:

$$10 * \beta * \lg(R_I / R_D) + \sigma(R_I - R_D) \\ = (SL - NL) / 2 + (1/2 - \rho)DT_D - TS_D / 2 + \\ (2 * GS_I - GS_D + 2 * GT_I - GT_D) / 2 \quad (4)$$

如果忽略左边第二项的影响, 式(4)可以写作:

$$\alpha_{dB} = (A + P - T + G) / \beta \quad (5)$$

式中: $\alpha_{dB} = 10 * \lg \alpha$, $A = (SL - NL) / 2$, $P = (1/2 - \rho)DT_D$, $T = TS_D / 2$, $G = (2 * GS_I - GS_D + 2 * GT_I - GT_D) / 2$ 。

从声纳截获因子 α_{dB} 的定义可以看出: 当 $\alpha_{dB} > 0$ 时, 表明敌方声纳截获接收机可以判定我方主动声纳的存在, 而我方主动声纳无法发现敌方, 此时我方舰艇有被敌方干扰或摧毁的危险; 当 $\alpha_{dB} < 0$ 时, 表明我方主动声纳能够发现敌方, 而敌方声纳截获接收机却无法判定我方的存在, 具有这样性质的主动声纳就被称为“静默”声纳或者低截获 (LPI) 声纳。

2 低截获声纳信号特性分析

通过式 (5) 可以看出, 声纳的低截获性能受多个方面的影响, 减少发射声源级是有效的低截获手段; 而通过信号设计和接收机设计来提高接收机自身处理的检测能力 (增大 ρ, GS_D, GT_D), 也有助于低截获性能的提高。

通过声纳截获概率因子方程和信号的空-时-频以及能量等 4 大要素分析, 认为低截获波形需要具备如下几个特征: 低频、大时宽带宽积、复合频(码)制、随机或非线性体制、时频捷变、低功率高能量效率等 6 项特征。一种性能良好的低截获波形一般具有上述 2 个或者多个特征。下面将针对具体的特征, 进行具体分析。

1) 低频。根据水声信号处理的有关研究, 低频声纳信号具有在声信道中的传播损失小, 对覆瓦安静型潜艇的反射目标强度大的优点, 是现代反潜型声纳的一个趋势。如果考虑信号的低截获问题, 在声纳探测距离下, 低频信号的传播损失小, 相应的最大发射功率就可以降低, 有利于隐蔽自身; 另外,

对于缺乏主动声纳信号先验信息而只能利用能量累积或者短时 FFT 进行时频捕捉的声纳截获接收机而言, 低频主动信号极容易和其本舰的主要噪声谱段混淆在一起, 增加了其虚警概率, 增大截获难度。因此, 采用低频有利于自身隐蔽和反截获。

2) 大时宽带宽积。根据模糊度原理和匹配滤波理论, 时间带宽积 (BT 积) 越大, 信号的联合分辨能力越好, 在高斯背景下, 经过匹配滤波的输出增益越大。如果考虑低截获的问题, 在限制反射能量的条件下, 大 BT 积的信号相当于将原来传统波形 (比如连续波 CW) 在时频空间内相对集中的时频能量沿时频轴扩散开去, 有利于低截获的性能提高; 而接收增益增加, 根据截获因子方程, 相当于减小了 G, 也有利于声纳低截获性能的提高。但是在水声信号处理中, BT 积的大小受到多种因素的限制。

一方面, 信号的发射脉宽 T 受声纳的探测范围、混响、信道起伏 (时间相干性) 的限制。首先是探测范围, 对于收发共置的声纳, 发射脉宽就是接收的盲区, 信号发射脉宽过宽会影响声纳对近程目标的探测; 而对收发分置的声纳, 接收机同样面临直达波抑制问题, 因为直达波一般比目标回波高出几个甚至几十个 dB, 如果发射脉宽过长, 直达波造成的方位能量泄漏会影响其它方位的目标回波的检测。其次, 混响的影响, 因为作为干扰的混响强度与发射信号的长度也具有 3 dB 的倍增关系, 增加信号长度并不能提高输出信混比, 反而扩大了混响影响的范围, 不利于微弱目标的检测。最后, 信道起伏的影响, 在海洋信道中特别是浅水中声起伏现象相当严重, 而信道的起伏会产生回波的时间衰落, 从而造成相干检测失配, 性能下降。如果发射脉宽太大, 大于信道的相干时间, 信道的起伏引起回波的不相关, 影响接收性能, 深水中的相干时间为 10.5 万正弦波周期, 50 Hz 时大于 1/2 h, 浅水中的相干时间为 10.4 万正弦波周期, 500 Hz 时大于 3min; 同时如果发射脉宽 T 太大, 遇到目标急转弯或加速运动时, 若 T 不满足小时间带宽条件 ($T \leq c / (2f_0 \Delta v_T)$, Δv_T 为目标在 T 时间内的变化), 则会造成相干检测的加速失配。

另一方面, 信号的发射带宽 B 同样受到信道的多途和频散效应的影响。目标回波的时间扩展引起的回波频率衰落效应, 致使距离分辨单元内的回波能量减小, 必须使波形的距离分辨率 ($1/B$) 不小于目标回波的时间扩展 L, 才能使相干检测减少性

能的损失。如果带宽太宽,使信道不满足窄带条件,信道频散效应所产生的波形畸变便不能忽略,而采用宽带处理,设备的开销增大,处理增益却不一定增加,因此对于远程探测,特别是浅水中的远程探测,宽带信号的选择需要谨慎。

因此,由于信道和窄带条件的影响,传统窄带声纳信号的 BT 积不能太大,以往研究表明,对于浅水远程探测,脉宽一般在 1~2 s 范围,带宽在 100~300 Hz 左右,这样 BT 积也只有几百。但是对于以远程探测为目的的低截获声纳而言,这样所取得的接收增益是不够的,举例说明:假设发射脉宽 T 为 2 s,带宽 B 为 200 Hz,噪声相关半径 $\Delta\tau$ 为 500 μs ,则被动截获接收机的能量检测器增益 $GT_I = 5\log(T/\Delta\tau) = 18.01 \text{ dB}$,低截获声纳接收机的匹配滤波器增益 $GT_D = 10\log(2TB) = 29.03 \text{ dB}$,则 $2GT_I - GT_D = 6.99 \text{ dB} > 0$,仍然不理想。为了弥补单个脉冲 BT 积的不足,雷达和国外一些声纳中常采用脉冲串的形式来等效增大时宽积。所谓脉冲串,就是利用传统的单个短脉冲在时域或者频域上按照一定规则组成一串长脉冲的信号形式,这类形式的波形具有板钉状的模糊度函数和梳状化的频谱,因此又被成为“梳状信号”,它们既克服了单个长时宽带脉冲的许多缺点,又保持了较高的时间处理增益,还具有较好的多普勒分辨能力和距离分辨能力、组合形式多样和处理方式多变灵活等特点,是一种比较好的低截获波形形式。以最简单的 FM 脉冲串 (PTFM) 为例,说明波形的低截获性能:假设脉冲串由 20 个脉宽 T_0 为 500 ms 的 FM 短脉冲组成,则发射脉宽 T 可以达到 10 s,带宽 B 为 200 Hz,低截获声纳接收机的匹配滤波器脉间非相干累加检测器增益为 $GT_D \approx 10\log(2NT_0B) = 36.3 \text{ dB}$,如果截获接收机增益仍然为 18.01 dB,则 $2GT_I - GT_D - 0.1 \text{ dB} < 0$,低截获性能有了较大地提高,同时由于是窄脉冲串受信道多途起伏的影响相对长脉冲为弱,相干检测的失配损失相对小些。脉冲串或者脉间调制序列若采用复合频(码)制,可以取得更好的低截获效果。

3) 复合频(码)制。复合频(码)制就是在一组复合脉冲信号或者一组脉冲串中,含有不同频段或者不同码制方式的子脉冲段。采用“复合频(码)制”波形设计方法,一方面丰富了主动声纳波形特别是脉冲串的组合形式,使发射脉冲串兼具不同体

制信号的特点;另一方面,出于低截获考虑,由于被动的截获接收机一般使用窄带滤波和线谱检测的方法来进行主动信号的捕捉,如果采用复合频(码)制波形,因为其时频谱具有多频段、梳状化和噪声化等特点,一般的截获检测方法不容易收集到波形的全部能量和时频特征信息。此外,由于水声信道特别是浅水信道中,声纳信号的混响特性以及起伏特性与频率有关,不同信道不同频率,所引起的混响强度和声起伏有很大差别,因此,采用复合频制可以避免由于信道对不同频段的影响,所造成的性能损失,当然这里的复合频段指的是频段与频段之间的频率跳变较大的情况。一些简单的信号比如跳频信号(FHOP),BPSK 等,都具有复合频(码)制的特点。而采用正交码、Costas 码进行复合的调频脉冲串(OC-PTFM、Costas-PTFM),具有较好的低截获性能。

4) 随机或非线性体制。在通信中,具有随机特性和混沌特性的编码调制信号具有良好的低截获性能;同样,将具有这样特点的编码信号应用与声纳低截获探测中依然能够获得较好的低截获性能。但是通信中对低截获的考虑角度与低截获探测有一定的差别,通信主要是考虑信号信息的保密能力和还原能力,而探测中主要考虑的是截获和探测最大作用距离比的大小,即截获因子的大小。因此,在使用随机和混沌调制信号时,发射的功率必须进行严格控制,同时必须考虑水声信道起伏对其的影响。伪随机码调制、噪声调制、非线性 LFM 等信号都是属于此类。

5) 时频捷变。捷变范围不仅限于脉内捷变也包括脉间捷变。由于大多数截获接收机都是通过时间上累积提取信号的有效特征(比如频率,带宽,脉宽等)来完成对主动信号的截获。因此,在波形设计中,按照一定规律或者完全随机地在一个“短”的时间周期内对信号的频率,带宽,码制及调制方式进行变化,对声纳信号的低截获性能的提高非常有利。至于信号捷变的时间周期长短的选择和变化规则,必须受到两方面的制约:一方面,必须与水声信道结合,考虑信道的时间相干性以及针对不同频率不同体制的波形影响规律;另一方面,也受到接收机设计的限制,在低截获声纳探测的战术要求及其可行性中进行折衷选取,如 Costas 信号就属于这种类型。复合频(码)制,随机或非线性体制以及时频捷变构成了低截获声纳信号设计的 3 个独特原则。

(下转第 80 页)

算法实现简单，具有很好的工程应用前景。

该关联算法的关联正确率还有待于进一步提高，下一步的工作重点是更好地实现关联的正确率。反馈机制也是多传感器信息融合研究领域的一个重要方向，如何在多传感器航迹融合中引入反馈机制也是下一步迫切需要解决的问题。

参考文献:

[1] 韩红, 刘允才, 韩崇昭, 等. 多传感器融合多目标跟踪中序贯航迹关联算法[J]. 信号处理, 2004, 20(1): 30-34.

[2] 何子述, 夏威. 现代数字信号处理及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

(上接第 73 页)

参考文献:

[1] DiSTI. GL Studio Version 3.0 User's Guide, U.S.A <http://www.dist.com/Products/glstudio>, 2008.

[2] 汪乐舟, 张合新. 某型导弹模拟训练仿真系统的研究[J]. 兵工自动化, 2009, 28(2):10-12.

[3] 樊世友, 邸彦强, 朱元昌. GL Studio 软件在视景仿真建模中的应用[J]. 计算机工程, 2002, 28(3): 260-261.

[4] 高颖, 邵亚楠, 等. GL Studio 在飞行座舱模拟器中的仿

(上接第 76 页)

6) 低功率高能量效率。低截获的一个核心思想就是进行严格的能量控制，因此发射信号的能量效率便是考核其低截获性能的一个重要标准。而根据文献发射信号能量效率可以定义为待测脉冲信号辐射能量与以待测信号频带为中心的单频信号的比值。不同的信号具有不同的发射效率，发射效率高的波形有利于信号的检测。

图 1 描述了多种主动声纳能量效率对比，表 1 给出了几种信号的能量效率。

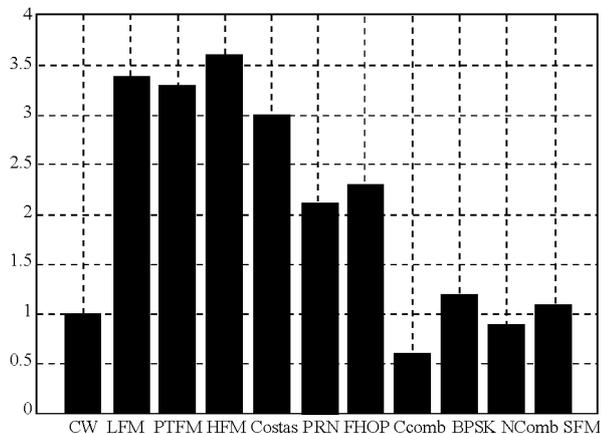


图 1 主动声纳信号能量效率对比

[3] 杨露菁, 耿伯英 译. (美) 霍尔 (Hall,D.L.) 等 编著. 多传感器数据融合手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.

[4] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.

[5] Leigh A. Johnston and Vikram Krishnamurthy. An Improvement to the Interacting Multiple Model (IMM) Algorithm[J]. IEEE transactions on signal processing, 2001, 49(12): 2909-2923.

[6] 郭治. 现代火控理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.

[7] 乔向东, 李涛. 多传感器航迹融合综述[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2): 245-250.

真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(1): 257-260.

[5] 李哲煜, 张响, 等. 大型运输机综合训练器虚拟仪表系统的研究[J]. 计算机仿真, 2007, 24(7): 247-250.

[6] 朱渊超, 车建国, 等. 基于 GL Studio 的某型雷达面板仿真[J]. 电脑开发与应用, 2006, 19(5): 21-25.

[7] 李栩冰, 郭喜庆, 冯祺. 一种基于 Lab Windows/CVI 的 GL Studio 插件调用方法[J]. 系统仿真技术, 2008, 4(1): 45-46.

[8] Charles Petzold. Programming Windows(Fifth Edition)[M]. Seattle: Microsoft Press, 2009:1198-1200.

表 1 部分主动声纳波形能量效率

波形	能量效率	波形	能量效率
CW	中	Costas	中
LFM	高	PRN	中
HFM	高	New COMB	中
SFM	高	PTFM	高
FHOP	中	OC-PTFM	高
COX COMB	低	Costas-PTFM	高
BPSK	中	MCPC	高

3 结束语

分析了影响低截获主动声纳信号的诸因素，并从低频、大时宽带宽积、复合频（码）制、随机或非线体制、时频捷变、低功率高能量效率等 6 个方面对低截获声纳的信号特征进行了剖析，对于今后选择 LPI 声纳的信号有一定指导作用。

参考文献:

[1] Stove, Hume, Baker. Low probability of intercept radar strategies[J]. IEEE Proc. Radar Sonar Navig., 2004, 151(5): 249-260.

[2] 张锡熊. 低截获概率 (LPI) 雷达的发展[J]. 现代雷达, 2003, 25(12): 1-4.

[3] 周胜, 林春生. 水雷主动声引信低截获特性分析[J]. 海军工程大学学报, 2009, 21(1): 91-95.