

一种低截获水声遥控信号的设计方法及性能分析

王燕^{1,2}, 韩成龙^{1,2}, 范展^{1,2}, 梁国龙^{1,2}

(1. 哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 提出了一种基于时频扩展技术的低截获水声遥控信号设计方法, 分别采用多载波技术和直序扩频技术实现水声遥控信号的扩时调制和频谱扩展。分析了信号的时宽带宽对低截获性能的影响, 采用 Wigner-Ville 分布对时频扩展前后信号的能量分布进行了对比研究, 利用可检测距离的概念定量分析了信号时频扩展前后的低截获性能。理论分析和仿真结果表明, 该时频扩展信号具有低的瞬时功率及谱密度, 处理增益大, 可检测距离小, 能够高可靠地实现信息的隐蔽传输。

关键词: 低截获; 扩时; 扩频; 多载波; 可检测距离

中图分类号: TB567

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-03-0260-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.03.015

The design and performance analysis of a low intercept probability signal for underwater acoustic remote control

WANG Yan^{1,2}, HAN Cheng-long^{1,2}, FAN Zhan^{1,2}, LIANG Guo-long^{1,2}

(1. Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;
2. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: A low probability of intercept (LPI) signal for underwater acoustic remote control, which is obtained by utilizing time-frequency spreading technique, is proposed in this paper. Both the Multi-carrier technique for time spreading modulation and the direct sequence spreading spectrum technique (DSSS) are used in the signal design. The relationship between Time-Band width and LPI performance is analyzed, and the comparisons of the energy distribution between original signal and modulated signal are also made. The concept of detectable distance is applied to quantifying the LPI performance. Theoretical analysis and computer simulation indicate that this LPI signal has advantages in lower instantaneous power and spectral density, higher processing gain, and closer detectable distance, and so it can be used reliably to achieve the information transmission with a low probability of intercept.

Key words: low probability of intercept; spreading-time; spreading-spectrum; multi-carrier; detectable distance

0 引言

低截获水声遥控系统要求在高可靠信息传输的同时, 降低被截获的概率, 从而保证指令的保密性及发射平台的隐蔽性。提高低截获性能的手段主要有^[1,2]: (1) 中继发射技术, 将需要大功率发射的远程通信通过中继台的转发形成多个低功率、隐蔽性高的近程通信; (2) 长时间积累技术, 在不降低信号总能量的同时, 将能量散布到长时间区间内以降低瞬时功率, 从而减小被截获概率; (3) 扩谱通信技术, 通过频谱的展宽来分散信号能量在频域上的分布, 降低谱密度, 同时增加敌方接收机的频域

匹配难度; (4) 复合调制技术, 通过不同调制方式的组合隐藏信号和增加解调难度。近年来, 低截获信号的设计成为研究热点。文献[3]使用混沌扩频序列对信号进行调制, 并研究了直序扩频系统的低截获性能。文献[4]提出了一种相位随机化技术, 通过降低混沌调制信号之间的关联性来降低被截获的概率。在对低截获性能的定量研究中, 文献[5]给出了可检测距离的概念, 并对若干系统的低截获性能进行了定量研究。现今对基于扩谱技术的低截获信号设计研究得较多, 而忽视了信号的时域扩展对低截获性能的影响。本文提出了一种基于时频二维扩展技术的低截获水声遥控信号设计方法, 并利用 WVD(Wigner-Ville Distribution)和可检测距离的概念对该信号的低截获性能进行了分析研究。

1 低截获水声遥控信号设计方法

由香农定理知, 在传输最大熵一定时, 可以通

收稿日期: 2013-06-02; 修回日期: 2013-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(51279043, 51209059)、国家“863”计划(2013AA09A503)资助项目。

作者简介: 王燕(1973—), 女, 哈尔滨人, 教授, 博士生导师, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 范展, E-mail: fanzhan@hrbeu.edu.cn

过增加信号带宽和持续时间来降低对信噪比的要求，从而降低被截获的概率。

对于期望接收机而言，信号的时间带宽积越大，经过匹配滤波后的输出增益越大，由截获因子方程，低截获性得到了提高。若限制发射能量，则大时间带宽积的信号相当于将原来传统波形在时频空间内相对集中的能量沿时频轴扩散开去，有利于低截获性能的提高^[1]。

扩频技术利用伪随机码对信息的调制，将待发信号扩展到一个很宽的频带上，其发射信号具有宽频谱、低谱密度的特点。扩时技术^[6]可看作扩频技术的对偶实现，该技术利用信号在时域上的扩展，降低了瞬时功率。

在扩时调制中，与扩时序列相乘是在频域中进行，因而在扩时调制前后需要将信息信号分别进行傅里叶变换和反变换。若将信息码视为频域数据，直接与扩时序列相乘，再进行反傅里叶变换同样可以完成扩时调制，此时，扩时调制可通过图1实现。

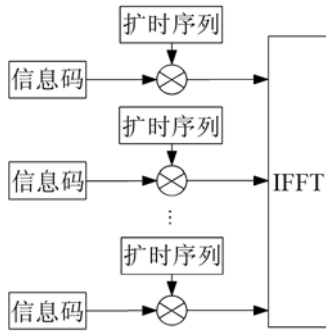


图1 扩时调制的实现框图

Fig.1 Block diagram of time spreading modulation

在多载波系统中，信息被调制到各个子载波上，每个符号是经过调制的子载波之和，其载波调制过程可以通过IFFT完成。由图1可以看到，该扩时调制的实现可以视为多载波调制，其基带信号为与扩时序列相乘后的信息序列，即信息序列被调制为相位不同的扩时序列。

扩时调制通过解调时信号能量在时域上的累积获得处理增益，若未扩时信号与扩时信号的能量相同，则两者的通信可靠性能相当。设多载波信号的频率间隔为 Δf ，则其时域宽度 $T=1/\Delta f$ ，即能量分布在时域宽度 T 内，此时，多载波信号可表示为^[7]

$$s(k\Delta t) = \sum_{i=0}^{M-1} d_i \exp(j2\pi i \Delta f \times k\Delta t) = \sum_{i=0}^{M-1} d_i \exp(j2\pi i \times \frac{1}{T} \times k \frac{T}{M}) = \sum_{i=0}^{M-1} d_i \exp(j \frac{2\pi i k}{M}) \quad (1)$$

其中： Δt 为采样间隔； d_i 为各信息码； M 为信息码个数， $0 \leq k \leq M-1$ 。信息码经过 N 位扩时序列的调制后，总符号数变为 NM ，因而当基带信号为相位不同的扩时序列时，所需的子载波数增加为 N 倍，若不增加总的频带宽度，则频率间隔变为 $\Delta f/N$ ，时域宽度增加为 NT ，此时信号可表示为

$$s(k\Delta t) = \sum_{i=0}^{NM-1} d'_i \exp(j2\pi i \times \frac{1}{NT} \times k \frac{NT}{NM}) = \sum_{i=0}^{NM-1} d'_i \exp(j \frac{2\pi i k}{NM}) \quad (2)$$

式中， d'_i 为经过扩时序列调制后的信息序列， $0 \leq k \leq NM-1$ 。若信号总能量一定，则同样的能量分布在更宽的时域区间上，瞬时功率也随之降低。可以看到，在该多载波调制中增加了子载波数，降低了频带利用率，同时也完成了时域扩展，降低了瞬时功率。

将信息信号进行扩时与扩频的二重调制，从而可以在瞬时功率与谱密度上均表现出良好的低截获性能。综上所述，本文设计的低截获水声遥控信号的调制框图如图2所示。

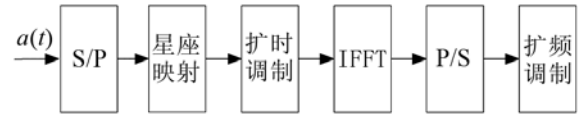


图2 低截获水声遥控信号实现框图

Fig.2 Block diagram of implementing LPI signal for underwater acoustic remote control

2 性能分析

研究经过时频扩展调制后信号的瞬时功率与谱密度的变化，并以此分析信号的低截获性能。扩频技术的实现基础是扩频序列优良的自相关特性，以 m 序列为例，其功率谱为^[8]

$$G_c(f) = \frac{1}{N^2} \delta(f) + \frac{N+1}{N^2} \times \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left(\frac{\sin(\frac{k\pi}{N})}{\frac{k\pi}{N}} \right)^2 \delta\left(f - \frac{k}{NT_c}\right) = \frac{1}{N^2} \delta(f) + \frac{N+1}{N^2} \text{sinc}^2 A \text{rect}(fT_c) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(f - \frac{k}{NT_c}\right) \quad (3)$$

式中， $G_c(f)$ 为 m 序列功率谱函数， N 为 m 序列码长， T_c 为码片宽度， $\delta(f)$ 为冲激函数。经过扩频调制后，信号频宽扩展为 $1/T_c$ ，较调制前提高了 $10 \lg(T_a/T_c)$ (T_a 为信息符号宽度)；因扩频前后能量不变，则其谱密度下降了 $10 \lg(T_a/T_c)$ 。由傅里叶变

换的对偶性, 矩形成形 m 码的反傅里叶变换 $h(t)$ 应与 $G_c(-t)$ 有关, 即有

$$f(h(t)) = \sqrt{G_c(-t)} = \sqrt{\frac{1}{N^2} \delta(t) + \frac{N+1}{N^2} \sin^2(tT_c) \sum_{k=-\infty, k \neq 0}^{\infty} \delta\left(t - \frac{k}{NT_c}\right)} \quad (4)$$

$h(t)$ 形式与 $G_c(f)$ 相似, 应与其具有类似特性, 因而在频域中利用 m 码调制可完成时域扩展, 并降低瞬时功率。

文献[9]和[10]通过不同方法研究了扩时前后信号瞬时功率的变化, 并得到扩时后信号瞬时功率的上限值

$$P^{TS}(t) \leq \frac{N\Omega_c^2}{4\pi^2} (1 + \sqrt{2(N-1)/F}) \quad (5)$$

其中, Ω_c 为码片宽度, N 为扩时倍数, $F = N^2 / (2 \sum_{k=1}^{N-1} |c_k|^2)$, 称为扩时序列的品质因数。

若将扩时系统看作滤波器, 则未经扩时的信号可视为经过一个理想低通滤波器, 其瞬时功率上限为

$$P^{NTS} \leq \frac{N^2 \Omega_c^2}{4\pi^2} \quad (6)$$

则信号的瞬时功率上限值较扩时前下降了 $10 \lg(\frac{N}{1+2\sqrt{(N-1)/F}})$ 。

信号的瞬时功率和谱密度的降低, 使得系统可在更低信噪比条件下正常工作, 其原因在于信号的时频扩展带来期望接收机处理增益的提高, 其处理增益应为扩时增益 G_T 与扩频增益 G_S 之和:

$$G = G_T + G_S = 10 \lg \frac{BT}{B_T} \quad (7)$$

其中, BT 为时频扩展前信号的时间带宽积, $B_T T$ 为时频扩展后信号的时间带宽积。

为定量研究低截获性能, 有学者提出利用可检测距离(detectable distance)^[5]这一概念来衡量通信系统的低截获性能。该方法的基本思想为假定截获接收机为仅判决是否存在信息传输的一个简单的平方-积分-判决检测器, 在虚警概率 P_{FA} 一定的前提下研究信号检测器的检测概率 P_D 与相对距离 d/d_0 的关系。选取一个合适的 P_D (如 0.5), 并得出此时的可检测距离 d/d_0 。可检测距离越小, 表明截获接收机需要更靠近发射机以检测到信号, 因而系统的低截获性能越好。信号检测器原理如图 3 所示。

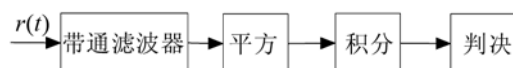


图 3 信号检测器原理框图

Fig.3 Block diagram of signal detector

设 $n(t)$ 为接收端的带限高斯白噪声, 其双边功率谱密度为 $N_0/2$, E 为信号能量, 若使虚警概率 P_{FA} 一定, 则信号检测器门限可表示为^[5]

$$L = \sqrt{(2N_0^2 T \omega) \text{erf}^{-1}(1 - 2P_{FA})} + N_0 T \omega \quad (8)$$

式中, ω 为带通滤波器带宽, T 为积分时间。

检测概率 P_D 表示为

$$P_D = \frac{1}{2} \text{erfc} \left[\frac{L - N_0 T \omega - E}{\sqrt{2N_0^2 T \omega}} \right] \quad (9)$$

时频扩展信号在不降低通信可靠性的前提下, 其时频平面上的能量密度较未经时频扩展时小得多。同时, 若接收机希望截获全部的信号能量, 需要设置更宽的频带范围及更大的观测时间, 此时进入接收机的噪声能量也随之增大, 在保持虚警概率不变时, 检测概率会降低。可以看到, 时频扩展信号利用宽的时间和频率分布区间使可检测距离减小, 低截获性能随之提高。

3 仿真研究

利用 WVD 对比分析经时频扩展调制前后信号能量的分布。传送信息码 20 bit, 采用 QPSK 映射, 多载波符号宽度为 2.58 ms, 频宽为 3.88 kHz, 时频扩展后符号宽度为 80 ms, 频宽为 25.6 kHz, 扩时扩频序列均为 31 位 m 序列, 扩时 31 倍, 扩频 6.6 倍。图 4 为原始信号、扩频信号及时频扩展信号的 Wigner 分布。由图 4 可以看到, 经过扩频调制后, 信号能量分布到宽的频率区间内, 能量密度有所降低, 经过时频扩展调制后, 能量分布区间在时间和频率轴上均得到扩展, 能量密度相对于仅经过扩频调制的信号进一步降低。

图 5 为原始系统、扩频调制系统以及时频扩展系统的误码率曲线。传输信道为带限高斯噪声信道且加入时间选择性衰落特性, 发射平台与接收平台相对速度为 3 m/s。扩频调制系统正常工作的信噪比较原始系统有所降低, 而时频扩展信号正常工作的信噪比能进一步降低至 -12 dB, 信号完全湮没在噪声中, 在未匹配时不易检测, 具有较好的低截获性能。利用可检测距离的概念对低截获性能进行定量研究。假定截获接收机对系统特性足够了解, 即信号检测器的观测时间与符号宽度相同, 带宽与期望接收机带宽相同。仿真中设置路径损耗指数 $n=4$, 若选择 $P_D=0.5$, 则由图 6 可知, 原始信号的可检测距离为 0.282, 扩频信号的可检测距离为 0.141, 时频扩展信号的可检测距离为 0.141, 时频

扩展信号的可检测距离为 0.086, 与仅进行频谱扩展的信号相比进一步降低。对于时频扩展信号, 当遥控距离为 10 km 时, 截获接收机距发射机距离需小于 0.86 km 才能发现存在信息传输, 可检测距离降至时频扩展前的约 0.3 倍。

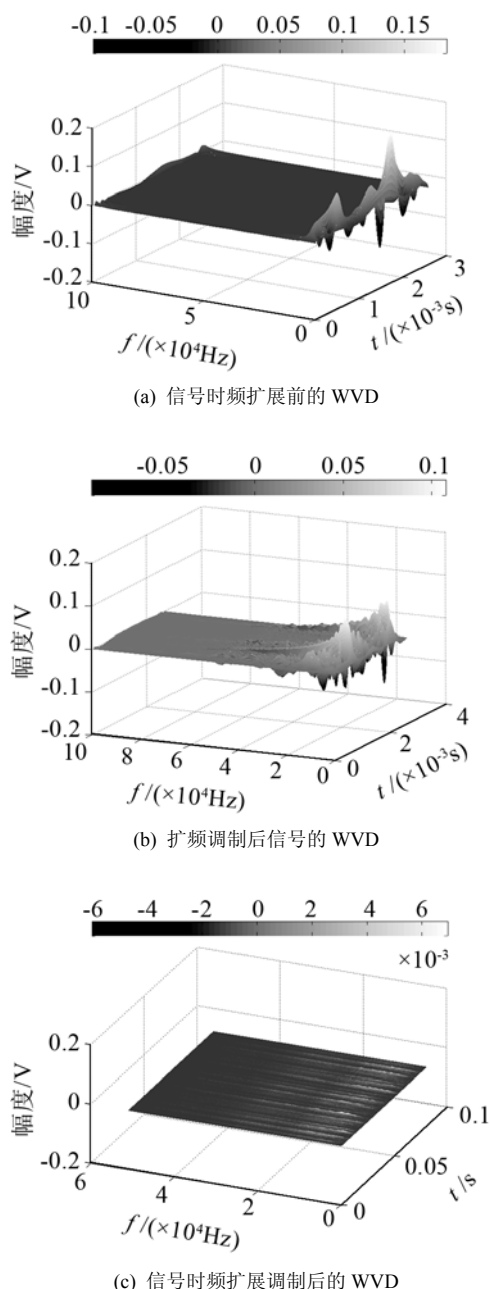


图4 原始信号、扩频信号及时频扩展信号的 Wigner 分布
Fig.4 Wigner distributions of original signal, spectrum-spreading signal and time-frequency spreading signal

4 结论

本文提出了一种基于时频扩展技术的低截获水声遥控信号的实现方法, 并对其低截获性能进行了定量分析。通过对比分析表明, 将信号能量扩展

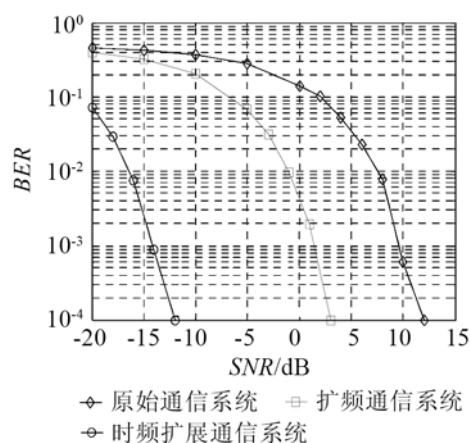


图5 三种系统的误码率曲线

Fig.5 BER curves for original system, spectrum-spreading system and time-frequency spreading system

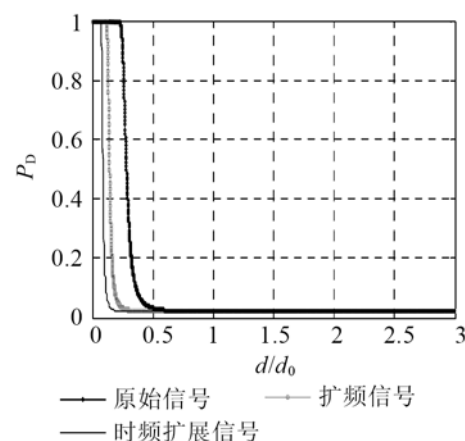


图6 检测概率与相对距离的关系曲线

Fig.6 Detection probabilities vs. distance for original system, spectrum-spreading system and time-frequency spreading system

到宽的时间和频率区间, 不仅可降低瞬时功率及谱密度, 还可提高期望接收机的处理增益, 时频扩展后信号的可检测距离降为扩展前的 0.3 倍, 大大提高了低截获性能。此外, 该方法实现简单, 性能良好, 具有较好的应用前景。

需要指出的是, 时频扩展技术在提高系统低截获性能的同时, 会带来频带利用率和通信速率的损失。所以, 在低截获水声遥控系统的设计中, 还需要综合考量低截获性、通信可靠性以及通信效率等重要指标。但时频扩展技术仍不啻为构建低截获水声遥控系统的有效途径。

参考文献

- [1] 何惠江, 刘军凯, 刘雪辰, 等. 声纳低截获技术方法与策略研究[J]. 鱼雷技术, 2010, 18(2): 99-103.
HE Huijiang, LIU Junkai, LIU Xuechen, et al. Techniques for low probability of intercept sonar[J]. Torpedo Technology, 2010, 18(2): 99-103.
- [2] 黄鹏刚. 低截获概率雷达技术研究[J]. 现代电子技术, 2003(18):

- 24-28.
HUANG Penggang. Analysis of low probability of intercept radar technology[J]. Modern Electronic Technology, 2003(18): 24-28.
- [3] JIN Yu, YU Dongyao. Detection performance of chaotic spreading LPI waveforms[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 2(4): 390-396.
- [4] Atwal S, Gagnon F, Thibeault C. An LPI wireless communication system based on chaotic modulation[C]// Military Communications Conference, 2009. IEEE. 2009: 18-21.
- [5] Weeks G D, Townsend J K. A method and metric for quantitatively defining low probability of detection[C]// Proc. of IEEE MIL-COM. Boston, USA: IEEE, 1998: 821-826.
- [6] WEINER A M, HERITAGE J P, SELEHI J. Encoding and decoding of femtosecond pulse[J]. Optics Lett, 1985, 13(4): 300-312.
- [7] 尹长川, 罗涛, 乐光新. 多载波宽带无线通信技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004: 23-25.
YIN Changchuan, LUO Tao, LE Guangxin. Multi-carrier broadband wireless communication technology[M]. Beijing: Beijing University of Posts & Telecommunications Press, 2004: 23-25.
- [8] 曾兴雯, 刘乃安, 孙献璞. 扩展频谱通信及其多址技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 13-17.
ZENG Xingwen, LIU Naian, SUN Xianpu. Spread spectrum communication and its multiple access technology[M]. Xi'an: Xiidian University Press, 2004: 13-17.
- [9] Data T. Evaluation of pseudonoise sequence in time spread pulse position Modulation/Code Division Multiple Access Systems[J]. Electronics and Communications in Japan: Part 1, 1996, 79(10): 35-44.
- [10] 陈洪, 廖洁, 张尔扬. 一种基于扩时的直接序列扩频系统抗脉冲干扰方法[J]. 解放军理工大学学报自然科学版: 2006, 7(3): 220-224.
CHEN Hong, LIAO Jie, ZHANG Eryang. Method to suppress pulsed noise interference of DSSS based on time spreading[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2006, 7(3): 220-224.

中国科学院声学研究所东海研究站赴舟山市科技局开展合作调研

2014年5月29日,浙江省舟山市科技局、中国科学院声学研究所东海研究站(简称东海站)在舟山组织召开了科技合作调研会。舟山市科技局局长郭力泉、东海站党委书记、站长胡长青、舟山市海洋科学城建设管理局副局长陈勇、中国科学院上海分院科技合作处黄河、舟山市科技局对外科技合作交流中心主任孔万伦、东海站王润田主任、冯海泓主任、周红生主任及舟山各区科技局相关人员、舟山市企业家代表共计30余人参加调研会。

郭力泉局长重点介绍了舟山市科技资源、科技体系现状与舟山市科技发展趋势,并指出舟山成为首个以海洋经济为主题的国家战略层面新区,标志着舟山开发已经纳入国家发展总体规划,他希望,通过与东海站深入的合作与交流,可以促进舟山的科学发展,跨越发展和创新发展。

胡长青站长做了题为“大力推进院地合作,加速成果转移转化”的专题汇报,他从东海站的基本情况、院地合作情况、重点学科发展、部分科技成果、产业化项目五个方面进行了详细的汇报。他表示,近年来随着与舟山市的密切联系,东海站与越来越多的舟山企业开展了项目合作,通过与舟山市普陀区政府共建“中国科学院声学研究所东海研究站普陀技术转移工作站”,深化了合作机制,为更好地开展院地合作奠定了基础。会上,东海站与舟山施诺海洋科技有限公司合作共建的“舟山施诺声学监控技术研究中心”成功签约,这也标志着东海站与舟山市的合作上了一个新的台阶。