## 分段副本相关器的两种快速实现

### 马 艳, 年 华, 李志舜

(西北工业大学航海学院,陕西西安 710072)

摘要:由于目标的转动或海平面的起伏,声信号在海洋中传播会发生频率上的扩展,这将引起匹配滤波器性能的衰减,此时的最佳检测器为分段副本相关器。针对分段副本相关器点处理算法的速度瓶颈问题,提出了两种基于 FFT 的快速算法,讨论了它们的计算量和存储量,并进行了数值仿真。结果表明,两种算法都可以在保证计算精度的同时 有效提高速度。

关键词:频率扩展信道;分段副本相关;计算精度;存储量 中图法分类号:TB556 文献标识码:A 文章编号:1000-3630(2008)-02-0255-05

#### Two fast algorithms of segment replica correlator

MA Yan, NIAN Hua, LI Zhi-shun

(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi an 710072, China)

Abstract: Due to the variation of target s orientation or the fluctuation of sea surface, acoustic signal will spread in frequency while propagating in the sea. Such a channel is called a frequency-spreading channel. The performance of a matched filter will be lowered under such circumstances, and the optimal detector will be the segment replica correlator (SRC). The calculation speed is the bottleneck in SRC implementation. Two fast algorithms based on FFT are proposed and their calculation abilities and memory capacities are discussed. Numeric simulation results show that the two algorithms can achieve more accuracy as well as faster speed.

Key words: frequency spreading channel; segment replica correlator; calculation accuracy; memory capacity

#### 1 引 言

海洋是一种复杂传输介质,声信号在其中传播 经常会因为海洋的起伏、多径等因素而发生畸变,例 如时间扩展、频率扩展和角度扩展等。这些都会引 起理想信道的最佳检测器--副本相关器的性能衰 减,所以针对不同的信道模型都有其最佳检测器。 已经证明<sup>[1]</sup>:在频率扩展信道中的最佳似然比检测 器为分段副本相关器。鉴于运算速度对工程实际应 用中硬件规模等有很大影响,本文研究了其快速算 法,并对运算量和存储量进行了详细讨论。

作者简介: 马艳, 女(1974-), 副教授, 博士后, 主要研究方向有水下信 号与信息处理, 目标检测、估计和识别。 通讯作者: 马艳, E-mail: mayan303@nwpu.edu.cn

#### 2 频率扩展信道模型及其最佳检测器

设发射信号为 f(t),满足能量归一化和正交性, 其时宽、带宽分别为: T, B。线性调频信号可精确满 足该假设,而双曲调频信号等其他宽带信号可以很 好地逼近<sup>[2]</sup>。

2.1 信道模型

海洋环境动力学研究的内容包括散射体的运动、海洋表面的波动和发射机与接收机的运动等。由于目标的起伏(如目标方向的改变)反射信号包络将 产生时变衰减,对应于频域就是频率的扩展。

频率扩展信道的接收波形可以看作是用某种时 变函数对发射波形的一种幅值调制。给定信道时变 函数 w(t),则接收信号为<sup>[3]</sup>:

收稿日期: 2007-01-16; 修回日期: 2007-04-08

 $r(i) = aw(i)f(i - n_0) + v(i) i = 0, 1, ..., N-1 (1)$ 式中,  $f_s$ 为采样频率,  $n_0/f_s$ 为双程时延, a 为衰减因 子。右边第一项为发射信号经过信道在目标上的反 射得到的回波, v(i)为干扰, 即噪声与混响之和。为 计算方便, 假设噪声和混响均为均值为零的白高斯 过程。这种信道称为快速衰落信道(Fast Fading Distortion), 简称为 FFD 信道。由于时域的相乘可 表示为发射信号 Fourier 变换与 FFD 信道函数 Fourier 变换的卷积, 该信道又被称为频率扩展信 道。在该模型中, 调制函数 w(i)是一个时变函数, 这 里采用分段常数的组合对其模型化, 每段的长度为  $T_c$ , 即:  $M_c=T/T_c$ 是分段数, 每段的 $\widetilde{w}_k$ 是零均值单位 方差的复高斯白噪声。

2.2 分段副本相关器

高斯白噪声背景下,理想信道的最佳似然比检 测器是副本相关器(RC)<sup>[3]</sup>,其检验统计量为:

$$\eta_{LRT} = \left| \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{i=0}^{N-1} f^{*}(i) r(i) \right|^{2}$$
(2)

从式(2)可以看出,该统计量是通过接收信号与 参考信号(发射信号)的时域相关的平方得到的。由 频率扩展信道的模型可知,其目标回波信号与慢起 伏、点目标的模型不同,但在相干时间内,可认为它 是慢起伏点目标,因此在每一段相干时间内副本相 关器仍是最佳检测器。对每段相关结果求和,这样 的检验统计量是频率扩展信道的最佳检测器,即分 段副本相关器。其检验统计量可表示为

$$\eta_{LRT} = \sum_{k=0}^{M-1} \left| \sqrt{\frac{2M}{N}} \sum_{i=0}^{N/M-1} f^{*}(i + \frac{kN}{M}) r(i + \frac{kN}{M}) \right|^{2}$$
$$= \sum_{k=0}^{M-1} \left| \sqrt{\frac{2M}{N}} < f_{k}, r_{k} > \right|^{2}$$
(3)

式中: M=M<sub>c</sub>=T/T<sub>c</sub>, f<sub>k</sub>, r<sub>k</sub> 分别是发射信号和接收信号 的第 k 段。

#### 2.3 SRC 和 RC 的统计特性

为了比较 SRC 和 RC 在 FFD 信道目标回波的 检测性能,分别研究背景为高斯白噪声, RC 和 SRC 对于 FFD 信道的目标回波时的统计性能。

2.3.1 RC 的统计特性

背景噪声的方差为 1, 没有信号时  $\eta_{LRT}$  是一个自由度为 2 的中心  $\chi^2$  分布。

在 FFD 信道有目标回波的情况下, RC 检测器 的检测性能:  $\eta_{LRT} = |z|^2$ 。z 是循环复高斯随机变量, z~ N(0, 2V), V= $\alpha^2$ N/M<sub>c</sub>+1, 于是  $\eta_{LRT}$ /V~ $\chi^2$ (2)。 2.3.2 SRC 的统计特性

在高斯白噪声背景下,  $\eta_{LRT}$  是 2M 个 N (0, 1)随 机变量的平方和。也就是说  $\eta_{LRT}$  是自由度为 2M 的 中心  $\chi^2$  分布, 即 y(n) ~  $\chi^2$ (2M)。因此给定虚警概率, 其检测门限可通过标准  $\chi^2$  分布求得。

在 FFD 信道有目标反射回波的情况下, 匹配的 SRC检测器 (M=M<sub>c</sub>), 即信道的相干维数等于 SRC 检测器的维数  $\eta_{LRT} = \sum_{k=0}^{M_c-1} |z_k|^2$ ,  $z_k$  是相互独立循环复高 斯随机变量, 且  $z_k \sim N(0, 2V)$ , 而 V= $\alpha^2 N/M_c$ +1。因此  $\eta_{LRT}(n_0)$  服从自由度为 2M<sub>c</sub> 的中心  $\chi^2$  分布<sup>[4]</sup>。

图 1 是在采样率为 10kHz,脉冲时间为 128ms, 而信道的相干时间为 12.8ms,虚警概率为 0.01 时, 副本相关器(RC)和分段副本相关器(SRC)对频率 扩展信号的检测性能曲线。从图可以看出,如果以检 测概率为 0.5 时的信噪比来评价其性能,那么 RC的 检测性能为-13.5dB,而 SRC 的检测性能为-21.5dB, 比 RC 整整提高了 8dB,可见在信号回波发生频率 扩展时,分段副本相关器是最佳的检测器。





#### 3 分段副本相关器的快速算法

由相关定理可知,两组序列的相关可通过 FFT 将相关计算转化为相乘的形式,计算量将大大降低。 基于这种思想则考虑分段副本相关器的快速算法。

通常发射信号(副本)是有限长的,而接收信号 是无限长的。对于副本相关器,直接采用分段补零 的方法对整段副本信号和接收信号流做相关运算<sup>[5]</sup>;





图 2 快速 SRC 方法 1 的流程图

Fig.2 The flow diagram of fast SRC algorithm I



图 3 快速 SRC 方法 2 的流程图 Fig.3 The flow diagram of fast SRC algorithm 2

而对于分段副本相关器,因为是在每一相干时间内 做相关,然后求和。在这种情形下,应用批处理计算, 情况较为复杂,本文讨论两种方法。

3.1 方法1

假设信号长度为 N, 分为 M<sub>c</sub> 段, 每段的长度为 M=N/M<sub>c</sub>=2', γ 为整数。实现分段副本相关器的方法 1 的思路可以通过图 2 来表达: 每次刷新 M 点数 据, 与内存中已有的数据组成 N 点的接收数据, 然 后按照相干时间分段, 对每段数据做 FFT 后和对应 段的副本相乘, 然后再进行反变换, 进而与前一批对 应段的数据叠加, 每段都获得 M 个点的副本相关结 果, 最后将这 M<sub>c</sub>段的相关结果相加就得到了 M 点的 分段副本相关检验统计量。

3.2 方法 2

仔细分析方法 1 可见, 方法 1 概念直观, 清晰, 但是每批计算完后还要保留后 M<sub>c</sub>-1 段的接收信号, 并且这些数据每次还都要再进行 FFT 变换, 这样就 同时造成了运算时间和空间的浪费。方法 2 将从分

表 1 三种实现方法的运算量比较结果 Table 1 Comparison of the calculations of three implementation methods

类别	复乘	复加
点处理	MN	M(N-1)
方法 1	2Nlog <sub>2</sub> (2M) +2M	2NIog <sub>2</sub> (2M)+N+M
方法 2	2Nlog <sub>2</sub> (2M) +2M	2NIog <sub>2</sub> (2M)+N+M

段副本相关器的机理出发。其原理如图 3 所示: 将副 本按照相干时间分段, 对每一段数据做 FFT, 刷新 M 点数据, 将这段数据做 FFT, 然后与每段副本的 FFT 再相乘, 对相乘结果做 Fourier 反变换, 进而与前一 批对应段的数据叠加, 就得到了 M 点的相关结果和 与下一批叠加的结果, 最后与前一批的相关结果累 加就得到了 M 点的分段副本相关检验统计量。

#### 4 运算量和存储量讨论

假定发射信号的长度为 N, 分为 M。段, 每段的

长度为 M, 副本的傅立叶变换结果已经存储在内存 中。所处理的信号都是经过解调的复信号。

4.1 运算量的讨论

批处理每批输出 M 点相关结果, 所以我们比较 几种算法计算 M 点的运算量。直接用复数乘法和加 法来度量, 结果如表 1 所示: 方法 1 和方法 2 的运算 量几乎相同。如果信号长度 N 为 2048, 分为 8 段时, 则每段的长度为 256,则点处理的计算量为 MN= 2096640,而快速算法 1 的计算量为 4Nlog<sub>2</sub> (2M)+ 3M+N=76544,所以点处理的运算量是快速算法的 13.4 倍, 而当分段为 4 时, 计算量为快速算法的 24 倍。 4.2 存储量的讨论

点处理在内存中仅仅需要存储副本和相同长度 的信号即可, 总共 4N。

方法 1 的存储量包括: 副本 2N, 信号 2N, 作2M 点 FFT 需要的信号空间 2M\*2(实部、虚部), 临时空 间 2M\*2, 旋转因子 2M, 存储临时相关结果的2MM<sub>c</sub>, 最终相关结果 2M(实部、虚部)总共为 6N+12M。

方法 2 的存储量包括: 副本 2N, 信号 2M, 作 2M 点 FFT 需要的信号空间 2M\*2(实部、虚部), 临时空 间 2M\*2, 旋转因子 2M, 存储临时相关结果的2MM<sub>c</sub>, 最终相关结果 2M(实部、虚部)总共为 4N+14M, 比 方法 1 少了 2(N-M)。如果要进行多路信号的检测, 那么节约的空间就很可观了。

#### 5 数值仿真

为了验证提出的算法的精度和速度,在此给出 一个在 Matlab 环境下的数值仿真例子。发射信号为常 用的线性调频信号,信号带宽为 2kHz,时宽为128ms, 高速采样频率为 200kHz,经过解调和降采后的采样 频率为 10kHz,解调频率为 20kHz,时延为 200ms, 信道的相干时间为 12.8ms,信噪比为-15dB 时的副 本相关器和分段副本相关器的三种实现检测统计量 如图 4 所示。

图 4(a) 为频率扩展信道的回波信号,4(b) 为副 本相关器的检验统计量,4(c)、4(d)、4(e) 分别为分 段副本相关器的点处理、快速方法 1 和快速方法 2 的结果。可以看出:(1) 在频率扩展信道中分段副本 相关器比副本相关器的检测增益高;(2) 三种分段副 本相关器的实现结果一致,误差非常小,快速算法可 以保证分段副本相关的精度,最大值都出现在信号



图 4 频率扩展信道的检测结果 Fig.4 Detection results of frequency spreeding channel

259

结束的时间点,即 328ms;另一方面,从计算时间 上,在 Matlab 环境中,点处理需要的时间为 2.3s,而 快速算法的计算时间为 0.1s,可见运算速度得到大 幅提升。(注:这里时间精度也仅为 0.1s)。

#### 6 结 论

针对频率扩展信道的回波信号的检测问题,本 文主要讨论了它的最佳检测器-分段副本相关器的 快速实现问题,基于 FFT 和分段副本相关器的机 理,提出了两种快速实现分段副本相关器的方法,系 统分析了三种实现方法的运算量和存储量,并进行 了数值仿真例证了:(1)分段副本相关器是频率扩展 信道的最佳检测器;(2)快速算法的确可以在保证计 算精度的同时大大提高运算速度。

本论文受西北工业大学 "英才计划 "资助。

#### 参考文献

- Baggenstoss P M. On detecting linear frequency-modulated waveforms in frequency and time dispersive channels: Alternatives to segmented replica correlation[J]. IEEE JOE, 1994, 19(4): 591-598.
- [2] 林茂庸,柯有安.雷达信号理论[M].北京:国防工业出版社, 1984,128-151.
   LIN Maoyong, KE You an. Radar signal processing[M]. Beijing: National Defence Industry Press. 1984, 128-151.
- [3] Friedlander B, Zeira A. Detection of broadband signals in frequency and time dispersive channel[J]. IEEE Trans. on SP, 1996, 44(7): 1613-1622.
- [4] 马艳,李志舜.不同干扰强度下三种鱼雷自导监测器的性能[J]. 声学技术,2003,22(2):95-97.
   MA Yan, LI Zhishun. Detection performance of three detectors of torpedo-homing under different-strength interference[J]. Technical Acoustics, 2003, 22(2): 95-97.
- [5] 胡广书编.数字信号处理--理论、算法与实现[M].北京:清华 大学出版社, 1997, 190-201.
  HU Guangshu. Digital signal processing-theory, algorithm and realization [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997, 190-201.

# 欢迎订阅 欢迎投稿

本刊编辑部地址:上海市小木桥路 456 号 邮编:200032 电话:(021)64048159-222 传真:(021)64174105