

水声 DS-CDMA 通信中多相位假设码片速率 自适应判决反馈均衡算法研究

王晋兴^{1,2}, 朱 敏¹

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘要: 研究了直接序列扩频码分复用(DS-CDMA)通信中基于多相位假设的码片速率自适应判决反馈均衡算法。水声信道的衰落和多普勒频移会严重影响扩频信号的相关特性, 需要在解扩之前进行多普勒频移补偿和信道自适应均衡。将空间分集-多普勒频移补偿-自最佳自适应判决反馈均衡算法应用到 DS-CDMA 通信中, 提出一种基于多相位假设的码片速率自适应判决反馈均衡算法, 并用实际的千岛湖实验数据和仿真数据对算法性能进行了分析。结果表明算法以增加计算复杂性为代价显著提高了 DS-CDMA 通信性能, 在复杂快变的多途和多普勒频移条件下可以保证低的误符号率, 在低信噪比条件下能够稳定工作, 总体性能良好。

关键词: 水声通信; 空间分集; 直接序列扩频; 码分复用; 码片速率判决反馈均衡; 相位假设

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-03-0212-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.03.003

A study of chip rate phase hypothesis adaptive decision feedback equalization for DS-CDMA underwater acoustic communication

WANG Jin-xing^{1,2}, ZHU Min¹

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A study of chip rate phase hypothesis adaptive decision feedback equalization algorithm for DS-CDMA underwater acoustic communication is presented. Underwater acoustic communication channel is a delay-Doppler double spreading channel. Fading and Doppler spreading severely degrade the correlation characteristic of the spread spectrum signals, so Doppler shift compensation and equalization are needed before decoding. By applying Space diversity-Doppler compensation-Fast Self-Optimized adaptive decision feedback equalization algorithm into DS-CDMA communication, a chip rate phase hypothesis adaptive decision feedback equalization algorithm for DS-CDMA underwater acoustic communication is proposed and its performance is analyzed with real lake trial data and simulation data. At the price of computational complexity, the algorithm dramatically improves DS-CDMA communication quality. Very low symbol error rate is achieved under fast changing multi-path and Doppler shift condition, and the equalizer is stable under low SNR. The overall performance of this algorithm is satisfactory.

Key words: underwater acoustic communications; spatial diversity; Direct-Sequence (DS) spread spectrum; Code Division Multiple Access (CDMA); chip-rate decision feedback equalization; phase hypothesis

1 引言

在扩频通信中, 当信道平稳时, 接收端使用简单的扩频序列相关器和相关判决器就可以完成正确的解扩频工作。然而水声信道是时变的时延和频移双扩散的复杂信道, 扩频通信系统所依赖的扩频序列的相关特性损失较严重, 需要结合信道均衡技术来改善扩频通信系统的性能。

美国 MIT 的 M.Stojanovic 等在水声扩频通信技术相关领域做了一系列的研究工作^[1-3], 认为相比于跳频扩频(FH/SS)通信方式, 与相干通信技术相结合的直接序列扩频(DS/SS)技术更适合应用在水声通信中, 提出了在直接序列扩频水声通信中可以使用的假设反馈均衡算法, 通过仿真和实验对性能进行了分析, 认为采用码片速率假设反馈均衡算法(CHF), 性能优于符号判决反馈(SDF)的接收机。

中科院声学所在水声通信技术研究过程中发展了一种空间分集-多普勒频移补偿-自最佳自适应判决反馈均衡算法^[4], 本文将其应用到 DS-CDMA 通信中, 提出了一种基于多相位假设的码片速率自适应判决反馈均衡算法, 并对其性能进行了分析。

收稿日期: 2008-06-16; 修回日期: 2008-09-01

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09Z212)

作者简介: 王晋兴(1981-), 男, 山西太原人, 博士研究生, 研究方向为信号与信息处理。

通讯作者: 王晋兴, E-mail: jx_wang81@hotmail.com

2 多相位 PN 序列的互相关特性

直接序列扩频码分复用(DS-CDMA)通信中采用优选的 PN 序列(下面简称 PN 序列),例如 Gold 序列、Kasami 序列等,具有良好的自相关特性和互相关特性^[5]。记 p 为复量形式的 PN 序列,原始数据信息映射成 MPSK 符号 $e^{j\beta}$ 与 p 相乘,得到携带数据信息的 DS-CDMA 符号 $p(\beta)=p \cdot e^{j\beta}$, $\beta=2\pi \cdot \frac{n}{m}$, ($n=1,2,\dots,m-1, m=2^N$)。下面对不同 DS-CDMA 符号的互相关特性进行分析。

发送端发射的符号 $p(\alpha)$ 经过信道以后,接收端得到接收符号 x 。为了判断 x 是哪一个符号,需要计算 x 与所有 $p(\beta)$ 在相关延时为 0 时的互相关系数:

$$\rho(x, p(\beta)) = \frac{\sum x \cdot (p e^{j\beta})^*}{\sqrt{\sum |x|^2 \cdot \sum |p|^2}} \quad (1)$$

在理想信道条件下,信号 $x=p(\alpha)$, 则互相关系数为:

$$\rho(x, p(\beta)) = \frac{\sum p e^{j\alpha} \cdot (p e^{j\beta})^*}{\sqrt{\sum |p|^2 \cdot \sum |p|^2}} = e^{j(\alpha-\beta)} \quad (2)$$

记 $\omega=\alpha-\beta$, 式(2)简化为:

$$\rho(\omega) = e^{j\omega} \quad (3)$$

当假设相位 β 和信号的实际相位 α 相同时(称为正确假设),此时 $\omega=0$, $\rho(0)=1$ 。

在实际信道条件下,正确假设的互相关系数应当最接近理论值 $\rho(0)$ 。定义相关系数距离 $dist(\omega)$:

$$dist(\omega) = |\rho(0) - \rho(\omega)| \quad (4)$$

$dist(\omega)$ 表示了当假设相位 β 和信号的实际相位 α 存在差异 ω 时,互相关系数与理论值 $\rho(0)$ 的距离,所有假设中距离最小的判定为正确假设,其它的是错误假设。正确假设和错误假设的复相关系数距离的差异越大则误判的可能性越小,误码率越低。由式(3)可知,在理想信道条件下,所有错误假设中复相关系数距离的最小值出现在 $\omega=2\pi/M$ 时。错误假设下复相关系数距离最小值 $dist(\omega)$ 与相位假设数目 M 的对应关系如表 1 所示。

从表 1 中的数据可以看出,随着 M 的增加,错误假设下 $dist(\omega)$ 的最小值下降较快,与正确假设的差异减小,误判的可能性增大。在实际应用中,由于

表 1 M 与错误假设下 $dist(\omega)$ 最小值的对应关系
Table 1 Relationship between M and minimum $dist(\omega)$

M	2	4	8	16
$\omega=2\pi/M$	π	$\pi/2$	$\pi/4$	$\pi/8$
$\min(dist(\omega))$	2.0000	1.4142	0.7654	0.3902

接收到的信号受到信道多途、频移、噪声等的影响,正确假设的复互相关系数变小,与错误假设的差异减小。为了保证性能,假设相位数 M 一般应取 2 或 4,在信道比较好的情况下可以取 $M=8$ 。

3 基于多相位假设的码片速率自适应判决反馈均衡算法

水声信道是一个时变的时延和多普勒频移双扩散信道。由于水声信道的可用带宽窄,使得 DS-CDMA 符号的时间长度相对较长,在一个符号的长度内信道的冲激响应和多普勒频移往往已经发生变化,尤其是当收发双方之间存在相对运动的时候,信道的冲激响应和多普勒频移会出现快速变化。如果基于对一个符号的判决结果来对信道参数进行调整,是不足以跟踪信道变化的,这会严重影响接收到的扩频信号的相关特性,造成判决的错误。因此要想在快速变化的水声信道中获好的 DS-CDMA 通信质量,需要以码片速率进行多普勒频移补偿和信道自适应均衡,快速进行信道特性补偿,改善扩频信号相关特性,降低判决错误概率。

3.1 空间分集-多普勒频移补偿-自最佳自适应判决反馈均衡算法

中科院声学所在水声通信技术研究过程中发展了一种空间分集-多普勒频移补偿-自最佳自适应判决反馈均衡算法^[4],算法的整体流程如图 1 所示。算法采用空间分集来克服信道衰落,采用多普勒频移估计和补偿技术来消除多普勒频移的缓变部分,采用多通道自适应判决反馈均衡算法与多通道自适应相位补偿算法的联合算法来补偿信道特性、消除剩余的多普勒频移。该算法有三个特点:

- (1) 自适应算法均采用快速自最佳最小均方算法(Fast Self-Optimized Least Mean Square, FOLMS),其步长的调整也采用了自适应算法,具有更好的性能。
- (2) 相位补偿环节采用自适应相位补偿算法(FOLMSPC),其性能优于国外文献中所采用的锁相环。
- (3) 多普勒频移补偿算法和 FOLMSPC 相结合,有效解决运动状态下的多普勒频移影响。实验证明该算法具有良好的性能。

3.2 基于多相位假设的码片速率自适应判决反馈均衡算法

将上述空间分集-多普勒频移补偿-自最佳自适应判决反馈均衡算应用到 DS-CDMA 通信中,提出了一种基于多相位假设的码片速率自适应判决反馈均衡算法。

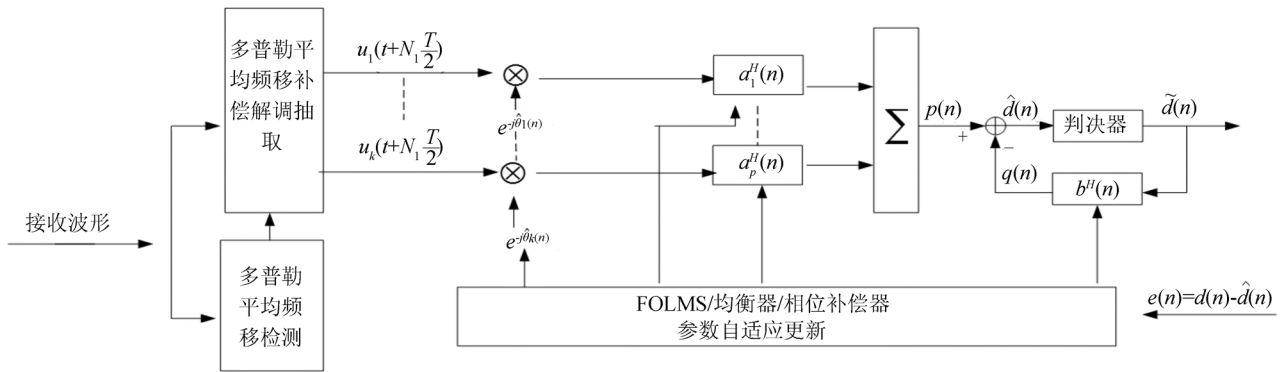


图1 空间分集-多普勒频移补偿-自适应最佳判决反馈均衡算法框图

Fig.1 Diagram of the Space diversity-Doppler compensation-Fast Self-Optimized adaptive decision feedback equalization algorithm

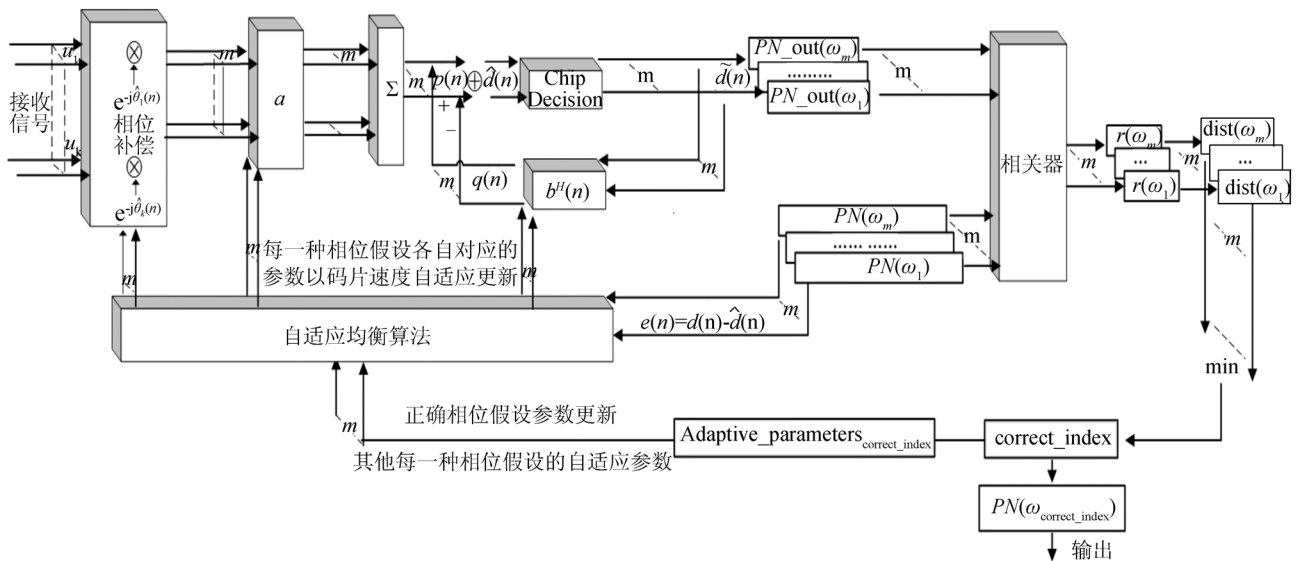


图2 基于多相位假设的码片速率自适应判决反馈均衡算法框图

Fig.2 Diagram of the Chip Rate Phase Hypothesis adaptive decision feedback equalization algorithm

算法流程如图2所示。图中 $u_k(n)$ 表示对 K 路输入的DS-CDMA扩频信号,已经过同步、多普勒偏移估计和补偿,被顺序划分成DS-CDMA符号序列。各DS-CDMA符号有 M 种可能的相位偏移,因此在处理每一个符号时用 M 个均衡器并行处理。假设输入的DS-CDMA为某个相位偏移的扩频符号,用该假设相位的扩频符号作为均衡器的判决结果来计算均衡器输出的每个码片的误差信号,按码片速率调整均衡器参数,直到完成对该符号内所有码片的均衡处理,计算均衡后的DS-CDMA符号与该假设相位的DS-CDMA符号的互相关系数,并计算相关系数距离 $dist(\omega)$ 。比较 M 次均衡处理的结果,具有最低的相关系数距离 $dist(\omega)$ 的假设相位偏移就是DS-CDMA符号的相位偏移。用正确的相位假设的扩频符号进行均衡的效果相当于当均衡器进行训练,均衡器参数的最终状态可以作为处理下一个符号时的均衡器初始状态。

算法需针对每一种相位假设做独立的码片速

率均衡处理,运算量随着相位假设数目和通道数的增加而线性增加,因此在应用中应选择适当的相位假设数目和通道数。

4 算法性能分析

为了检验本文提出的基于多相位假设的码片速率自适应判决反馈均衡算法(简称假设均衡算法)的性能,利用已有的湖试数据进行了仿真处理。实验地点为千岛湖,接收通道为8个,收发距离15m~5500m,相对速度0~2.3节,信号频带为7.5kHz~12.5kHz,码片速率5kcp/s。在仿真中选取了信源为PN序列、QPSK调制的相干通信数据。将PN序列视为扩频序列,应用本文所提出的算法进行处理。虽然按不同长度分割后的随机序列的自相关和互相关性能不如优选的扩频序列,但不影响仿真分析的基本结论。

4.1 算法抗多途和多普勒频移的效果

为了分析算法抗多途和多普勒频移的效果,选取了实验中信道冲激响应最复杂,且收发端存在相对运动的数据组进行了分析。通信距离 1103m~1218m,航速 1.08m/s~1.15m/s,信号的信噪比较高,但多途严重,图 3 中给出了典型的 3 个通道的冲激响应,可以看出不同深度上的信道冲激响应有显著差异。

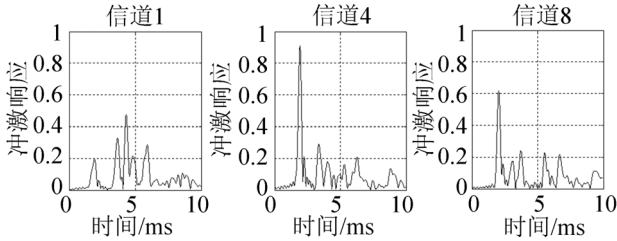


图 3 信道冲激响应
Fig.3 Channel impulse response

对上述信道条件下 8 个单通道的 1104 帧数据用两种算法分别进行处理。假设相位数 $M=4$, 码长 $L=63$ 。第一种算法为匹配滤波算法,对数据进行逐个符号相位补偿,再与本地符号进行相关,根据相关系数进行判决解码。第二种算法为本文所提出的假设均衡算法。图 4、5 是单通道一帧数据的处理后相关系数的分布示意图。图 4 是匹配滤波结果的相关系数分布,图 5 是假设均衡后的相关系数分布。可以看出,在单通道条件下通过假设均衡后,正确假设相关系数的幅值有明显的增加;全部假设相关系数的混叠程度有明显降低。

单通道数据,采用匹配滤波算法的误符号率为 7.8×10^{-3} ;采用假设均衡算法的误符号率为 4.9×10^{-3} ,相关距离 $\text{dist}(\omega)$ 为 0.4553,误符号率降低了 37%。但相对于算法开销,假设均衡算法对性能改善的程度并不理想。

使用 2 通道空间分集,联合运用基于多相位假设的码片速率自适应判决反馈均衡算法并且对同样的数据进行处理,相关系数分布见图 6。从图 6

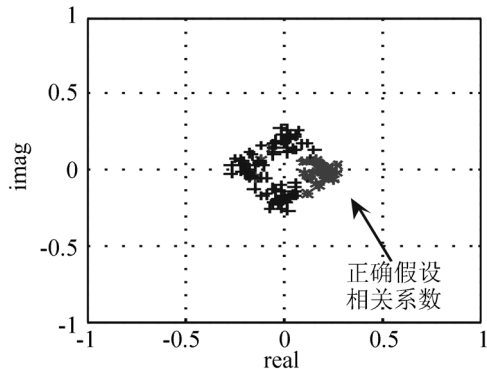


图 4 单通道数据匹配滤波的相关系数
Fig.4 Matched filtered single channel correlation coefficients

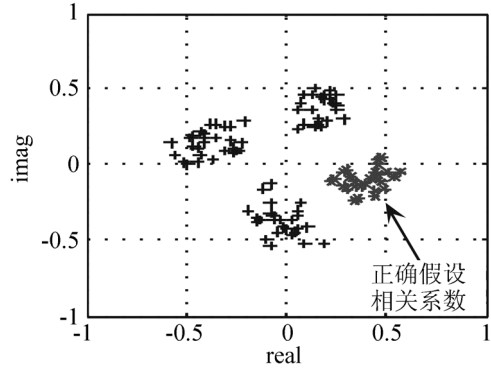


图 5 单通道数据假设均衡后计算的相关系数
Fig.5 Single channel: Correlation coefficients after equalization

可知,在使用 2 通道空间分集,算法显著提高了 DS-CDMA 符号的相关性,相关系数的幅值提高,离散度减小。采用直接计算相关系数的方法,数据的误符号率为 3.5×10^{-3} ;而运用假设均衡算法处理数据的误符号率为 0;相关距离 $\text{dist}(\omega)$ 为 0.6879,相比于单通道,采用 2 通道空间分集相关距离数值有所提高。

使用 4 通道的空间分集相关系数分布如图 7 所示,相关系数的分布有进一步改善,许多数据符号的正确假设的相关系数接近理论值,误符号率为 0;相关距离 $\text{dist}(\omega)$ 为 0.9202,相比于单通道、2 通道

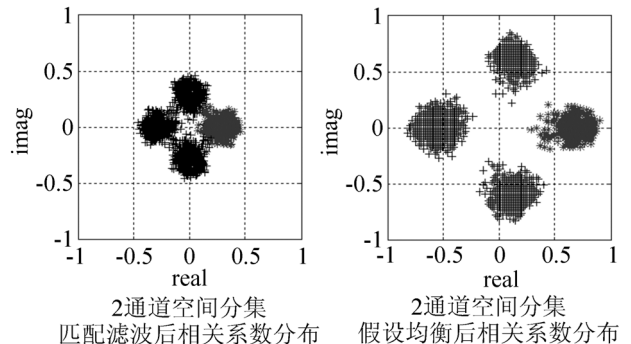


图 6 使用 2 通道空间分集计算相关系数分布(左图为匹配滤波计算的结果,右图为假设均衡后计算结果)

Fig.6 Combined channel number = 2: Correlation coefficients, Left: Matched filtered correlation coefficients, Right: Correlation coefficients after equalization

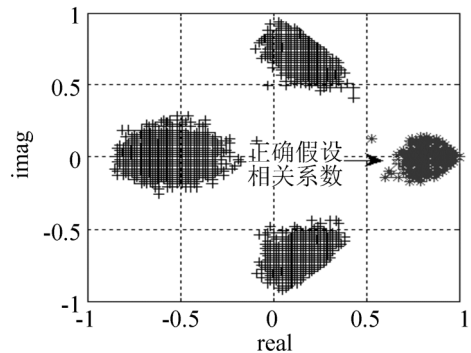


图 7 使用 4 通道空间分集 假设均衡后相关系数分布
Fig.7 Combined channel number = 4, Correlation coefficients after equalization

空间分集, 采用 4 通道空间分集相关距离数值进一步提高。

分析结果表明, 采用空间分集联合假设均衡算法能够显著改善 DS-CDMA 通信效果, 在复杂的多途和多普勒频移条件下保证低的误符号率。

4.2 不同扩频码长和不同空间分集通道数下算法的性能比较

分别对 DS-CDMA 码长 $L=15, 63, 255$, 空间分集通道数为 1、2、4、6、8 等情况进行了对比分析, 相位假设数 $M=4$, 结果见图 8。图中错误假设的复相关系数距离只给出了最小值。

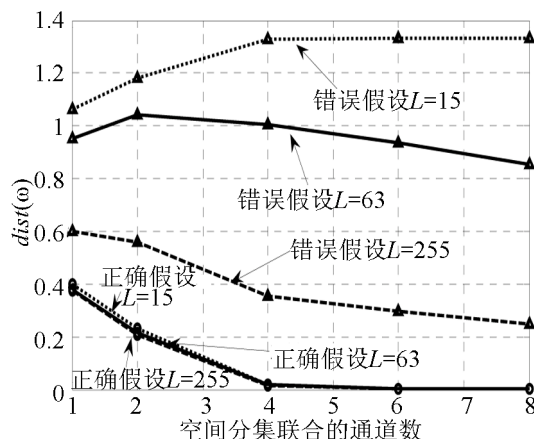


图 8 四相位假设下复相关系数距离与码长和空间分集通道数的关系
Fig.8 Relationship of Correlation coefficients with code length and channel number when phase hypothesis number is 4

(1) 当假设正确时, 各码长的 DS-CDMA 序列的复相关系数距离 $dist(\omega)$ 相近; 当假设错误时, $dist(\omega)$ 最小值随 L 的增大呈减小的趋势。这是由于均衡过程相对于对均衡器的训练, 会使得均衡器输出倾向于假设相位的 DS-CDMA 序列。因此码长不应过长。

(2) 随着使用的通道数目的增多, 正确假设的 $dist(\omega)$ 趋向于 0; 4 通道以下时, 通道数增加对性能的改善效果明显, 4 通道以上不明显。因此通道数应取 4 通道以下。

4.3 算法在低信噪比条件下的性能分析

扩频通信一般要求的信噪比低, 有必要对本文所提的基于多相位假设的码片速率自适应判决反馈均衡算法在低信噪比条件下的稳定性进行分析。由于信噪比低时难以准确计算测试数据的信噪比, 因此进行仿真分析。仿真中使用 4 通道分集, 引入多途和多普勒频移以及加性噪声的干扰, 信噪比设定范围 $-10\text{dB} \sim +5\text{dB}$, 扩频序列 $L=63$, 假设相位数目 $M=4$ 。仿真的结果如图 9 所示。仿真结果表明在 -8dB 信噪比下均衡器仍能够正常工作, 没有出

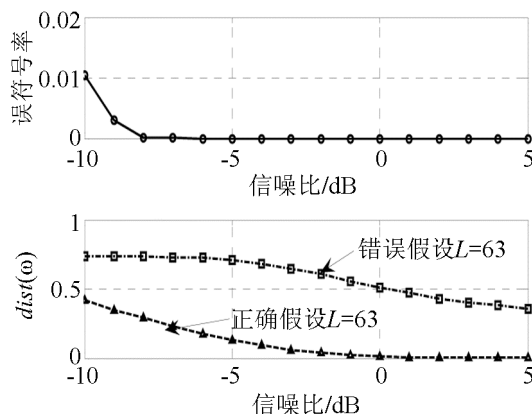


图 9 低信噪比条件下算法的性能。上图为误符号率, 下图为相关系数距离(相位假设数目=4)

Fig.9 Performance under low SNR condition. Up: Symbol error rate under different SNR. Down: Correlation coefficients under different SNR

现发散的情况。

在仿真计算的过程中, 用于存储某一假设对应均衡参数的空间开销与假设数目的增加呈线性增加关系; 在单处理器的条件下, 算法的处理时间也随假设数目的增加相应增加。在实际的应用中应选取合适的假设数目以降低算法的复杂度, 同时可以结合多处理器可降低运算时间。

5 结 论

本文将空间分集-多普勒频移补偿-自适应判决反馈均衡算应用到 DS-CDMA 通信中, 提出一种基于多相位假设的码片速率自适应判决反馈均衡算法, 并用实际的千岛湖实验数据和仿真数据对算法性能进行了分析, 结果表明算法以增加计算复杂性为代价, 显著提高了 DS-CDMA 通信性能, 在复杂快变的多途和多普勒频移条件下可以获得极低的误符号率, 在低信噪比条件下能够稳定工作, 总体性能良好。

参 考 文 献

- [1] M. Stojanovic, L. Freitag, S. Singh, and M. Johnson, Analysis of channel effects on direct-sequence and frequency-hopped spread-spectrum acoustic communication[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 8.
- [2] M. Stojanovic and L. Freitag, Hypothesis-feedback equalization for direct-sequence spread spectrum underwater communications[A]. Proc. IEEE Oceans'00 Conference[C]. 2000.
- [3] M. Stojanovic and L. Freitag, Wideband underwater acoustic CDMA: adaptive multichannel receiver design[A]. Proceedings of OCEANS MTS/IEEE[C]. 2005.
- [4] ZHU Weiqing, ZHU Min. Signal processing for high speed underwater acoustic transmission of image[J]. Acta Acustica, 2007, 32(5): 385-400.
- [5] John G. Proakis, Masoud Salehi, Gerhard Bauch. Contemporary communication systems using matlab and simulink. Second edition[M]. Beijing: Publish House of Electronics Industry, 2006, 313-327.