

基于格基约减的扩频通信多址干扰抑制算法

鲍亚川* 蔚保国

(中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081)

(卫星导航系统与装备技术国家重点实验室 石家庄 050081)

摘要: 在链路资源受限条件下的扩频通信应用中, 多址干扰是限制系统多用户服务能力和通信质量的主要因素。该文针对多址干扰消除问题, 首次将格基约减理论应用到扩频通信多址干扰消除中, 提出基于格基约减辅助的多用户检测算法, 通过格基约减变换实现对信号间互相关矩阵的正交性优化, 使多用户检测算法性能得到改进, 以较低的运算复杂度实现了逼近最大似然算法的检测性能。该算法在对抗强远近效应方面表现出优异性能, 不同于传统多用户检测算法在恶劣多址环境下检测性能的严重退化, 该算法能够保持对最大似然检测算法性能的逼近, 可以使扩频通信系统的传输可靠性、多用户服务能力以及环境适应性得到显著增强。

关键词: 扩频通信; 多址干扰; 多用户检测; 格基约减; 远近效应

中图分类号: TN914.42

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)05-1164-06

DOI: 10.11999/JEIT161104

Lattice Reduction Aided Multiple Access Interference Cancellation Algorithm of Spread Spectrum Communication

BAO Yachuan YU Baoguo

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

(State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: In the application of spread spectrum communication with limited wireless resource, Multiple Access Interference (MAI) is the main restraint element of the multiple user service capability and communication performance. Focusing on the MAI problem, lattice reduction theory is firstly applied to the MAI cancellation of spread spectrum communication. A lattice reduction aided multiple user detection method is proposed. With lattice reduction method, the orthogonality of the correlation matrix of multiple signals is improved. As a result, the error bit rate of Multiple User Detection (MUD) method is reduced, and near ML demodulation performance is reached with low complexity. High performance on near-far effect resistance is achieved with the algorithm. Contrary to the performance degradation of traditional MUD method in serious MAI scenario, lattice reduction aided multiple user detection method can maintain near ML performance. Transmission reliability, multiuser service capability and environment suitability of spread spectrum system can be improved remarkably with the algorithm.

Key words: Spread spectrum communication; Multiple access interference; Multiple user detection; Lattice reduction; Near-far effect

1 引言

扩频通信, 因其具有大容量、抗干扰等特征, 在卫星通信、卫星导航以及军民用通信等领域都得到了广泛的应用。作为一种自干扰体制, 其通信能

力以及应用会受到多址干扰问题的限制。在民用地面移动通信系统中, 多址干扰可以通过采用零相关扩频码、智能天线、功率控制、前向纠错编码设计等技术手段进行有效抑制^[1,2], 但是在军事通信和卫星通信等这类扩频通信系统中, 多址干扰问题的解决往往只能通过优化信号体制设计进行一定程度的缓解, 要实现通信容量的最大化往往需要在信号接收端采用多址干扰抑制技术^[3,4]。

作为提高扩频通信系统通信容量的一种有效手段, 多址干扰抑制技术多年来得到了深入发展, 现

收稿日期: 2016-10-18; 改回日期: 2017-03-06; 网络出版: 2017-04-06

*通信作者: 鲍亚川 baoyachuan@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(91638203), 国家重点研发计划(2016YFB0502102)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (91638203), The National Key Research and Development Program (2016YFB0502102)

有技术主要包括多用户检测和多址干扰消除两类。多用户检测(MUD)算法基于对用户信号间的相关性的计算,利用解相关技术实现多用户间多址干扰的消除,包括迫零(ZF)算法以及最小均方误差估计(MMSE)算法等传统算法,在此基础上进一步又衍生出了多种改进算法。文献[5]提出了基于 Hopfield 神经网络 MUD 算法,提高了 MUD 算法检测性能,但在用户数量较多时检测性能会明显下降。文献[6]提出了基于量子信号处理的加权正交匹配滤波算法,该算法不需要对噪声功率进行估计,但检测性能相比 MMSE 算法略差。文献[7]提出了一种基于施密特正交子空间跟踪和卡尔曼滤波的盲自适应 MUD 算法,降低了盲检测算法的运算复杂度。多址干扰消除技术包括了串行干扰消除和并行干扰消除技术两类,基于对各用户信号的相关检测,在对期望信号的检测中采用串行或者并行的方式对其他用户信号进行消除,该类方法性能相对于多用户检测是次优的,其多址干扰抑制效果会受限于对多用户信号的初始检测准确度,在多址干扰较为恶劣的情况下较早就会出现平台效应,多址干扰抑制性能不够理想^[8-10],但实践中将其与高增益纠错编码联合运用可以改善信号检测准确度,得益于其较低的运算复杂度和灵活的接收处理架构,在一些多址卫星通信系统中得到了应用。

本文首次将格基约减理论引入到扩频通信多用户检测中,提出了基于格基约减的扩频通信多用户检测算法,通过对多用户信号互相关矩阵的格基约减变换降低了信号间的相关性,结合多用户检测算法,以较低运算复杂度实现了逼近理论最优的最大似然算法性能。不同于传统多用户检测算法在恶劣远近效应条件下检测性能的恶化趋势,本文算法检测性能可以始终逼近于最大似然检测算法性能,在对抗远近效应方面表现出了优异的性能。

2 系统模型

扩频通信系统包括异步和同步两类^[11],在部分通信信道缓变场景下, N 路信号组成的异步系统可以等效为 $2N-1$ 路同步系统,本文基于同步系统模型进行研究。假设一个同步扩频通信系统,用户数为 N ,在高斯白噪声信道下接收信号为

$$r(t) = \sum_{k=1}^N A_k(t) b_k(t) \text{PN}_k(t) + n(t) \quad (1)$$

其中, A 为信号幅度, b 为信息比特,PN为信号扩频码, n 为背景噪声。

第 k 路用户信号的匹配滤波器的离散时间输出为

$$\begin{aligned} y_k &= \int_0^{T_b} r(t) \text{PN}_k(t) dt \\ &= \int_0^{T_b} \left[\sum_{k=1}^N A_k b_k \text{PN}_k(t) + n(t) \right] \text{PN}_k(t) dt \\ &= A_k b_k + \sum_{j=1, j \neq k}^N A_j b_j \rho_{jk} + n_k, \\ \rho_{kj} &= \int_0^{T_b} \text{PN}_k(t) \text{PN}_j(t) dt \end{aligned} \quad (2)$$

式中,第1项为期望信号的相干累积;第2项是其它信号与期望信号扩频码的互相关累积之和;第3项是信道噪声与期望信号的相关干扰。 T_b 为比特时长。

N 路信号的匹配滤波器输出为

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= [y_1, y_2, \dots, y_N]^T, \\ \mathbf{Y} &= \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1N} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{N1} & \rho_{N2} & \cdots & \rho_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_N \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{R}\mathbf{A}\mathbf{b} + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (3)$$

令 $\mathbf{H} = \mathbf{R}\mathbf{A}$, 式(3)可写为 $\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{b} + \mathbf{n}$ 。

根据匹配滤波器的相干累积结果进行比特判决:

$$\hat{\mathbf{b}} = \text{dec}(\mathbf{Y}) = \text{dec}(\mathbf{H}\mathbf{b} + \mathbf{n}) \quad (4)$$

其中, $\text{dec}(\cdot)$ 代表比特判决,直接根据匹配滤波相干累加结果进行判决,虽然在理论上具有较好相关性设计的扩频码可以使信号间互相关干扰显著降低,但是实际环境中当信号数量较多或者信号功率差异较大时,多址干扰仍将成为信号解调的主要误差源。

3 扩频通信多用户检测方法

ML算法是理论最优多用户检测算法,其原理如式(5)所示。基于预先产生遍历的发送序列集 $\{\mathbf{b}\}$,依据式(5)由接收信号 \mathbf{Y} 得到发送序列 $\hat{\mathbf{b}}$ 。

$$\hat{\mathbf{b}} = \text{argmin}(\mathbf{Y} - \mathbf{R}\mathbf{A}\mathbf{b}), \quad \mathbf{b} \in \{\mathbf{b}\} \quad (5)$$

ZF算法需要估计和构造信号间的互相关矩阵 \mathbf{H} ,通过解相关实现多址干扰的抑制。

$$\mathbf{G} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{b}} = \text{dec}(\mathbf{G}(\mathbf{H}\mathbf{b} + \mathbf{n})) = \mathbf{b} + \mathbf{n}' \quad (7)$$

ZF算法检测估计误差的协方差矩阵为

$$\varphi_{\text{ZF}} = E \left\{ (\hat{\mathbf{b}} - \mathbf{b})(\hat{\mathbf{b}} - \mathbf{b})^H \right\} = \sigma^2 (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \quad (8)$$

式中, σ^2 为噪声方差,将 $(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}$ 定义为解调误差系数,可以评估ZF检测对各路信号的噪声放大程度。在通常的情况下,ZF检测会使噪声放大。

最小均方误差检测相比较ZF算法,增加了对噪

声影响的估计, 可以对噪声实现更好的抑制。基本方法及协方差矩阵如式(9)-式(11)所示。

$$\mathbf{G} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}^H \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{b}} = \text{dec}(\mathbf{G}(\mathbf{H}\mathbf{b} + \mathbf{n})) = \mathbf{b} + \mathbf{n}' \quad (10)$$

$$\varphi_{\text{MMSE}} = \sigma^2 (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \sigma^2 \mathbf{I}_{N_t})^{-1} \quad (11)$$

由多用户检测算法估计误差协方差矩阵可以看到, 算法检测性能一方面受到噪声影响, 另一方面则会受到互相关矩阵正交性影响。如果互相关矩阵为正交矩阵, 多址条件下的多用户检测性能将与无多址的单路信号检测性能相一致。但实际应用中, 受限与伪码设计性能, 信号间难以完全正交, 同时信号间的不等功率也会导致正交性变差。寻求一种能够改善互相关矩阵正交性的方法, 将其运用到扩频通信多用户检测中, 是进一步提高扩频通信多址干扰抑制能力的一条重要途径。

4 格基约减算法

格(Lattice)是按照一定规律排列的离散点的集合^[12,13]。

设一组 n 维向量 $\mathbf{B} = [\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_m] \in R^n$, m 个向量彼此线性无关, 这组向量的所有整数线性组合就可以构成 m 维的格。向量 \mathbf{B} 就是这个格的一组基, 而 $\mathbf{t} = [t_1, t_2, \dots, t_m]^T$ 是由整数权值构成的系数矢量。格可记为

$$\mathbf{L} = \{\mathbf{l} = \mathbf{B}\mathbf{t}\} \quad (12)$$

多个初等列变换矩阵的乘积可以等效为一个幺模变换矩阵 \mathbf{T} 。只要 \mathbf{T} 为幺模矩阵, 则 \mathbf{B} 和 $\mathbf{B}\mathbf{T}$ 生成相同的格:

$$\mathbf{L}(\mathbf{B}) = \mathbf{L}(\mathbf{B}\mathbf{T}) \quad (13)$$

格基约减就是对格生成矩阵 \mathbf{B} 的各列进行一系列迭代变换后, 得到一组基, 而这组基中会包含近似的最短向量, 同时基向量之间的正交性得到改善。正交性的改善与格基本身的正交性有关, 即当格基本身正交性越差, 所能带来的改善将越明显。典型的格基约减算法包括 LLL 约减以及 Seysen 约减等^[14]。

LLL 约减算法^[15]中定义了正交缺陷度的概念, 设 $(\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_n)$ 是格 \mathbf{L} 的一组基向量, 由其构成基向量矩阵 \mathbf{H} , 则 \mathbf{H} 的正交缺陷度定义为

$$\Delta(\mathbf{H}) = \frac{\prod_{m=1}^M \|\mathbf{h}_m\|^2}{\det(\mathbf{H}^H \mathbf{H})} \quad (14)$$

式中, M 为 \mathbf{H} 的列数, \mathbf{h}_m 为 \mathbf{H} 的第 m 列, $\det(\cdot)$ 为行列式值。 $\Delta(\mathbf{H}) \geq 1$, 当且仅当 \mathbf{H} 为正交矩阵时, $\Delta(\mathbf{H}) = 1$ 。

设约减变换后的矩阵为 \mathbf{H}' , 如果 \mathbf{H}' 由 \mathbf{QR} 分解 $\mathbf{H}' = \mathbf{Q}'\mathbf{R}'$ 得到的矩阵 \mathbf{R}' 满足以下两个条件:

$$\text{条件 1: } \|\mathbf{r}'_{l,k}\| \leq \frac{1}{2} \|\mathbf{r}'_{l,l}\|, \quad 1 \leq l < k \leq n ;$$

$$\text{条件 2: } \delta \|\mathbf{r}'_{k-1,k-1}\| \leq \|\mathbf{r}'_{k,k}\| + \|\mathbf{r}'_{k-1,k}\|, \quad k = 2, \dots, n .$$

那么 \mathbf{H}' 就是基于参数为 $\delta(1/4 \leq \delta \leq 1)$ 的 LLL 约减后得到的。一系列迭代变换可等价于幺模变换矩阵 \mathbf{P} , $\mathbf{H}' = \mathbf{H}\mathbf{P}$ 。

Seysen 算法相比于 LLL 算法, 主要区别在于其定义了另外一个正交缺陷度公式^[16]:

$$S(\mathbf{H}) = \sum_{m=1}^M \|\mathbf{h}_m\|^2 \|\mathbf{h}_m^\#\|^2 \quad (15)$$

式(15)中设格生成矩阵 \mathbf{H} 为 M 列, \mathbf{h}_m 为 \mathbf{H} 的第 m 列, $\mathbf{h}_m^\#$ 为对偶矩阵 $\mathbf{H}^\# = ((\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H)^H$ 的第 m 列。由于同时考虑了原矩阵和对偶矩阵, 基于该正交缺陷度公式进行格基约减变换, 能获得具有更好正交性的格生成矩阵^[17]。

5 格基约减辅助的多址干扰抑制算法

将格以及格基约减的理论应用到扩频通信多用户联合检测中, 基于具有更好正交性的互相关矩阵 \mathbf{H}' 进行解相关运算, 可以实现对噪声影响更好的抑制, 使多用户检测性能得到改善。

格基约减辅助的多用户检测算法(LR-MUD)步骤如下所示:

(1)接收端收到多路扩频信号, 对各路信号进行信号估计, 并获得包括信号功率、信号间相对时延以及载波相位差等信息;

(2)基于信号功率、时延、载波相位信息, 利用本地伪码获得信号间互相关矩阵 \mathbf{H} ;

(3)利用 LLL 或 Seysen 格基约减算法对互相关矩阵进行格基约减处理, 获得变换矩阵 \mathbf{P} , 以及优化矩阵 $\mathbf{H}' = \mathbf{H}\mathbf{P}$, 取 $\mathbf{Z} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{X}$, 多用户扩频信号接收式可写为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{N} = \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{X} + \mathbf{N} = \mathbf{H}'\mathbf{Z} + \mathbf{N} \quad (16)$$

(4)采用 ZF 或者 MMSE 算法进行多用户联合检测:

$$\tilde{\mathbf{Z}}_{\text{LLL_ZF}} = (\mathbf{H}'^H \mathbf{H}')^{-1} \mathbf{H}'^H \mathbf{Y} \quad (17)$$

$$\tilde{\mathbf{Z}}_{\text{LLL_MMSE}} = (\mathbf{H}'^H \mathbf{H}' + \sigma^2 \mathbf{P}^H \mathbf{P})^{-1} \mathbf{H}'^H \mathbf{Y} \quad (18)$$

(5)对得到的 $\tilde{\mathbf{Z}}$ 在优化后的格点空间内进行修正量化:

$$\hat{\mathbf{Z}} = a \left(\lceil (1/a)\tilde{\mathbf{Z}} - (1/2)\mathbf{P}^{-1}\mathbf{I}_{N_t} \rceil + (1/2)\mathbf{P}^{-1}\mathbf{I}_{N_t} \right) \quad (19)$$

其中, $\lceil \cdot \rceil$ 表示取整, \mathbf{I}_{N_t} 表示 N_t 维的单位列向量, a 为能量归一化参数;

(6)由 $\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{P}\hat{\mathbf{Z}}$ 可得到最终的估计结果 $\hat{\mathbf{X}}$ 。

算法的基本流程如图 1 所示。需要指出的是，信号功率及信号时延估计的准确度对于多址干扰消除的效果有重要影响。对于多址条件下的信号功率估计，可以基于已知同步头对信号能量进行准确估计；对于时延和载波相位差，由信号跟踪环路给出，可采用加长积分时间、大块相关器设计等手段实现低信噪比下信号的稳定跟踪，对时延和载波相位差进行精确测量。改为 GPS 导航信号接收表明，可以实现对信号强度小于-160 dBm，信噪比为-4 dB 的弱信号的稳定跟踪。

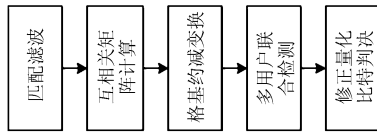


图 1 格基约减辅助的多址干扰抑制算法流程图

ML 算法复杂度为 $O(N_s^M)$ ，其中 N_s 为调制阶数， M 为信号数。ML 算法复杂度随信号调制阶数呈指数增长，难以进行工程实现。ZF 及 MMSE 算法复杂度相对较低，为 $O(M^3)$ ，主要运算复杂度均来自于矩阵求逆。LR-MUD 算法是在 MUD 算法基础上增加了格基约减处理过程，由此带来的运算量主要包括互相关矩阵的 QR 分解及变换矩阵 P 的求逆，由此所带来的复杂度增长是线性的，算法复杂度仍为 $O(M^3)$ ，因此 LR-MUD 算法相比于 ML 算法在信号数量较多以及高阶调制情况下会具有较大的运算复杂度优势。

6 算法性能仿真分析

如图 2 所示，针对用户数量为 6，扩频比为 16，信号功率随机变化范围为 0~6 dB，采用 QPSK 调制的扩频通信多用户检测进行了仿真实验，对所有信号误码率进行统计。采用 ZF 算法可以对多址干

扰实现有效抑制，相比匹配滤波估计误码率性能有了较为明显的改善，但相比于最大似然算法有较大差距。图中 LR-MUD 基于 ZF 算法，LR-MUD-L 采用 LLL 约减，LR-MUD-S 采用 Seysen 约减。LR-MUD 算法使解调误码率得到了明显的降低，由格基约减算法所带来的增益可达 4 dB 以上，且检测性能随信噪比的提高会逐渐逼近 ML 算法。Seysen 约减相比于 LLL 约减可以使 MUD 算法获得更多的解调增益，这也印证了 Seysen 约减相比较 LLL 约减能够对互相关矩阵实现更优的正交化变换。

图 3 所示为在信噪比为 0 dB、扩频比为 16 时不同信号数量条件下的信号解调仿真，一路信号作为期望信号，其他信号功率在 0~20 dB 范围内随机分布，对强弱远近效应场景进行模拟。LR-MUD 算法始终保持了对最大似然算法的逼近，解调误码率随信号数的增多呈现缓慢增长，多址信号数目越多，其相对于传统多用户检测算法的优势越明显。LR-MUD 相比 ZF 算法，相同误码率要求下其支持的大功率干扰信号数量由 2 个增长为 7 个。

图 4 所示为信号间互相关矩阵正交缺陷度随用户信号数量的变化趋势。随着信号数量的增多，原始的信号间互相关矩阵正交缺陷度会显著变差，结合第 2 节中对多用户检测算法误差的分析，信号互相关矩阵正交性的恶化，导致了传统 MUD 算法检测误差的变大。格基约减处理可以缓解因信号数量增多而导致的正交性恶化，反映到检测性能上，LR-MUD 算法检测误码率只是随信号数量增多缓慢增长。

图 5 所示为扩频比为 32，多址数为 6，信噪比为 -2 dB 时在不同信号功率比条件下的算法性能仿真。期望信号功率及噪声功率保持不变，其他 5 路信号功率逐渐增强，对期望信号误码率进行统计。随干扰信号功率的不断增强，匹配滤波检测误码率

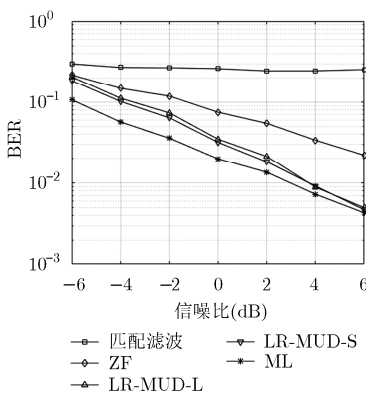


图 2 不同信噪比条件下的解调误码率

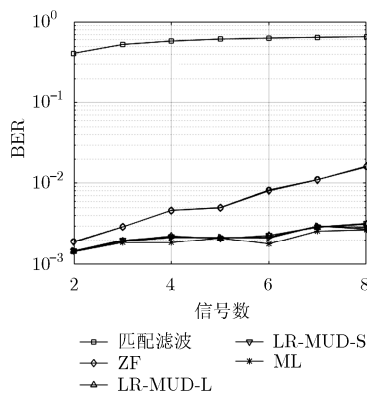


图 3 不同干扰信号数量条件下的期望信号解调误码率

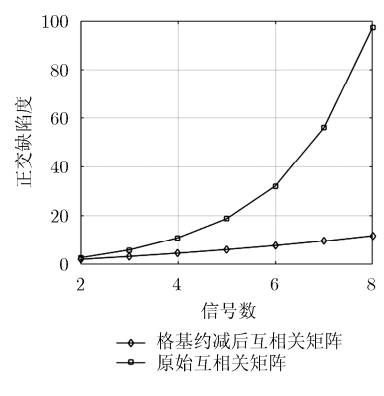


图 4 不同干扰信号数量条件下的互相关矩阵正交缺陷度

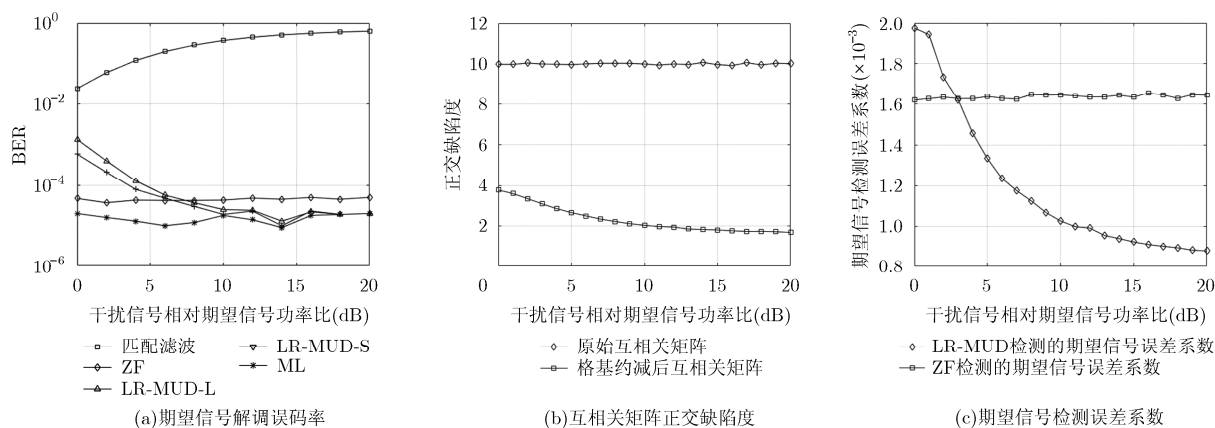


图 5 不同干扰信号功率比条件下的期望信号解调实验

会逐步上升。ZF 算法误码率保持不变，但相比 ML 算法性能保持了固定的差距。LR-MUD 算法在功率比较小时性能弱于 ZF 算法，但随功率比的提高，其解调误码率会不断降低并最终在功率比大于 10 dB 的条件下逼近了 ML 算法性能。这也反映出格基约减在扩频通信多用户检测应用中的一种特性，就是信号间互相关性能较好时，其对于解调所能带来的增益相对较小，甚至对单路信号解调会带来负面效果；但是如果扩频增益较小、信号数量较多或者信号功率差异较大导致信号间互相关性能较差时，格基约减所能发挥的作用将更为明显。

综合分析以上实验，LR-MUD 算法在恶劣多址场景下相比较传统 MUD 算法会有较大的性能优势，在信号数量较多以及干扰信号功率较强的恶劣远近效应条件下仍可以逼近理论最优检测性能。

7 结论

本文针对扩频通信中的多址干扰问题和多址干扰消除算法进行了研究，重点针对多用户联合检测算法进行了分析，基于对多用户联合检测算法误差理论的分析，有针对性地提出了基于格基约减辅助的扩频通信多用户联合检测算法，通过格基约减变换实现对互相关矩阵的正交优化，使得多用户联合检测算法的误码率性能得到改善。通过仿真实验验证了基于格基约减的多用户联合检测算法在对抗远近效应方面具有的显著优势，在信号数量较多以及信号功率控制不理想的恶劣条件下可以以较低的运算复杂度实现逼近于最大似然算法的检测性能，使扩频通信的环境适应性和多用户服务能力得到提高。

参考文献

- [1] ABDELAAL R, ELSAYED K F, and ISMAIL M. Optimized joint power and resource allocation for coordinated multi-point transmission for multi-user LTE-Advanced systems[J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 83(4): 1-22. doi: 10.1007/s11277-015-2543-7.
- [2] BOTELLA C, ERO G, and DIEGO M. Multi-user interference mitigation under limited feedback requirements for WCDMA systems with base station cooperation[J]. *Telecommunication Systems*, 2016, 61(3): 543-557. doi: 10.1007/s11235-015-0011-z.
- [3] HOU Y, LI M, and YUAN X. Cooperative interference mitigation for heterogeneous Multi-Hop wireless networks coexistence[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(8): 5328-5340. doi: 10.1109/TWC.2016.2555953.
- [4] ZHOU Qi and MA Xiaoli. Receiver designs for differential UWB systems with multiple access interference[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(1): 126-134. doi: 10.1109/ICUWB.2011.6058828.
- [5] ARNAU J, DEVILLERS B, MOSQUERA C, et al. Performance study of multiuser interference mitigation schemes for hybrid broadband multibeam satellite architectures[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications & Networking*, 2012: 132. doi: 10.1186/1687-1499-2012-132.
- [6] KECHRIOTIES G I and MANOLAKOS E S. Hopfield neural network implementation of the optimal CDMA multiuser detector[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1996, 44(4): 496-507. doi: 10.1109/72.478397.
- [7] 史双宁, 尚勇, 梁庆林. 一种新的线性多用户检测器[J]. *电子学报*, 2007, 35(3): 426-429. doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2007.03.008.
- [8] SHI Shuangning, SHANG Yong, and LIANG Qinglin. A novel linear multi-user detector[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(3): 426-429. doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2007.03.008.
- [8] YU Y, LI J, and WANG Z. Blind multiuser detection in MC-CDMA: Schmidt-orthogonalization and subspace

- tracking kalman filtering[C]. 3rd International Conference on Communications and Mobile Computing, Qingdao, 2011: 375-380. doi: 10.1109/CMC.2011.50.
- [9] XIE Z, SHORT R T, and RUSHFORTH C K. A family of suboptimum detectors for coherent multiuser communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1990, 8(4): 683-690. doi: 10.1109/49.54464.
- [10] ZHENG W, LI J, LUO Y, *et al.* Multi-user interference pre-cancellation for downlink signals of multi-beam satellite system[C]. International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, Xianning, 2013: 415-418. doi: 10.1109/CECNet.2013.6703358.
- [11] BAO Yachuan and YU Baoguo. A MAI cancellation algorithm with near ML performance[C]. 2015 IEEE International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN), Chengdu, 2015: 196-200. doi: 10.1109/ICCSN.2015.7296153.
- [12] BREMNER M R. Lattice Basis Reduction: An Introduction to the LLL Algorithm and Its Applications[M]. Boca Raton, FL, USA, CRC Press, Inc., 2011: 55-62.
- [13] DIAS S M and VIEIRA N J. Concept lattices reduction: Definition, analysis and classification[J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(20): 7084-7097. doi: 10.1016/j.eswa.2015.04.044.
- [14] LAMACCHIA B A. Basis reduction algorithms and subset sum problems[D]. [Master dissertation], Massachusetts Inst Technology, 1991.
- [15] LENSTRA A K, LENSTRA H W, and LOVASZ L. Factoring polynomials with rational coefficients[J]. *Mathematische Annalen*, 1982, 261(4): 515-534. doi: 10.1007/BF01457454.
- [16] NGUYEN P Q and STERN J. Lattice reduction in cryptology: An update[C]. 4th International Symposium on Algorithmic Number Theory, Netherlands, 2000: 85-112. doi: 10.1007/10722028_4.
- [17] SCHNORR C and EUCHNER M. Lattice basis reduction: Improved practical algorithms and solving subset sum problems[J]. *Mathematical Programming*, 2006, 66(1-3): 68-85. doi: 10.1007/bf01581144.
- 鲍亚川：男，1985年生，博士生，研究方向为扩频通信、卫星导航、高精度时间同步。
- 蔚保国：男，1966年生，研究员，研究方向为卫星导航系统总体设计。