一种新的 DBL-CDMA 扩频码

杨 星 余 政 李道本 邓双成

(北京邮电大学 信息工程学院, 北京 100876) (西安电子科技大学 ISN 实验室, 西安 710071)

摘 要: 构造了特殊的复数扩展矩阵, 将基本松同步码 (LS, Loose Synchronous) 和复数扩展矩阵进行克罗内克积, 设计出一种道本实验室码分多址 (DBL-CDMA, Dan Ben Lab Code Division Multiple Access) 互补分组地址码. 分析了该地址码的自相关和互相关特性, 以及该地址码的实现方法. 分析结果表明, 相对于基本 LS 码, 在和基本 LS 码码长一致下, DBL-CDMA 互补地址码增加了零相关窗口宽度、可用的码字数量和理想互补码的个数. 该地址组码码字的自相关和组内码字间的互相关值仅在几个时间偏移处有附峰. 理论推导与仿真结果相符.

关 键 词: 道本实验室码分多址扩频码; 扩频码; 克罗内克积; 零相关窗

中图分类号: TN 914.53

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2008)10-1126-04

New kind of DBL-CDMA spreading codes

Yang Xing Yu Zheng Li Daoben

(School of Information Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Deng Shuangcheng

(Xidian University State Key Lab of ISN, Xi'an 710071, China)

Abstract A new class of dao ben lab code division multiple access (DBL-CDMA) spreading codes with zero correlation window (ZCW) was presented, which is constructed by making kronecker product of basic loose synchronous (LS) codes and special complex matrix which is constructed by Barker sequence and its phase rotation. The auto-correlation and cross-correlation function of these new codes were analyzed and some basic theorems and corollaries on these new codes were proved. In addition, the realization methods of these new codes were also discussed. Compared with the basic LS codes, the new DBL-CDMA access codes extend the minimum ZCW, increase the number of available access codes and the number of perfect complementary pair for a fixed code length. Moreover, only few side lobes of auto-correlation and cross-correlation function appear in few time shift axis in the same group. The computer simulation results verify the validity of the theoretical derivations.

Key words DBL-CDMA spreading codes; LS spreading codes; kronecker product; zero correlation window

地址码设计是解决码分多址系统多用户码字间的多址干扰 (MAI, Multiple Access Interference) 和用户码字自身因多径产生的码间干扰 (ISI, Intersymbol Interference) 的一种手段. 零相关窗 (ZCW, Zero Correlation Window) 互补码[1-3]因在一定的时间窗口内自相关和互相关干扰都为零而能消除绝大部分的 MAI 和 ISI. DBL-CDMA (Dao Ben Lab Code Division Multiple Access) 扩频码是李道本教授发明的一种新型的互补地址码[4]. 众所周知, 可用的零相关窗互补码的码长、码字数量和窗口宽度三者存在矛盾[5]. 文献 [5-6] 提出组码增加可用的码字数量, 但文献 [5-6] 码字的利

收稿日期: 2007-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90604035)

作者简介: 杨 星 (1980-), 男, 河南郑州人, 博士生, sheepstar_monkey@yahoo.com.cn.

用率没有得到很大的提高. 本文将扩展矩阵推广到复数域, 对基本的 LS码字码片进行 kronecker 积(相当于对码片进行不同角度的旋转), 设计出一种新型的 DBL-CDMA 地址组码. 新型的地址组码在保持组间最小零相关窗与基本 LS码的最小零相关窗一致的情况下降低了码字的长度, 增加了可用的码字数量和每个码字的理想互补码数. 码字的自相关值以及组内码字的互相关值仅在几个时间偏移处有附峰.

1　LS码的基本定义

定义 **1**　两个长为 N 的码字 $\boldsymbol{c}=[c_1, c_2, \cdots, c_n, \cdots, c_N]$和 $\boldsymbol{s}=[s_1, s_2, \cdots, s_n, \cdots, s_N]$($c_i$, s_i 是复数 $|c_i|=|s_i|=1$, $i=1, \cdots, N$)组成新的码字 $(\boldsymbol{c}, \boldsymbol{s})$, $(\boldsymbol{c}, \boldsymbol{s})$称为 LS码字. $(\boldsymbol{c}, \boldsymbol{s})$的非周期自相关函数记为 $R_{(\boldsymbol{c}, \boldsymbol{s})}(\tau)$, 表示如下:

$$R_{(\boldsymbol{c}, \boldsymbol{s})}(\tau)=\begin{cases}\dfrac{1}{2N}\displaystyle\sum_{n=1}^{N-\tau}[c_n^{*} c_{n+\tau}+s_n^{*} s_{n+\tau}] & 0\leqslant\tau<N\\ \dfrac{1}{2N}\displaystyle\sum_{n=1}^{N+\tau}[c_n c_{n-\tau}^{*}+s_n s_{n-\tau}^{*}] & -N<\tau<0\end{cases}\tag{1}$$

符号 x^{*} 表示对 x 取共轭. 若 $0<\Delta<N$, $R_{(\boldsymbol{c}, \boldsymbol{s})}(\tau)=\begin{cases}0 & 0<|\tau|\leqslant\Delta\\ 1 & \tau=0\end{cases}$, 则令 $\tau_w=\max\{\Delta\}$称码字 $(\boldsymbol{c}, \boldsymbol{s})$是最小双边 ZCW 为 $2\tau_w+1$的窗口自互补码. 特别地, 当 $\tau_w=N-1$时, 称 $(\boldsymbol{c}, \boldsymbol{s})$为理想自互补码.

定义 **2**　两个不同的 LS码字 $(\boldsymbol{c}_1, \boldsymbol{s}_1)$和 $(\boldsymbol{c}_2, \boldsymbol{s}_2)$中 $\boldsymbol{c}_1$ 与 $\boldsymbol{c}_2$, $\boldsymbol{s}_1$ 与 $\boldsymbol{s}_2$ 的非周期互相关函数分别为

$$R_{\boldsymbol{c}_1, \boldsymbol{c}_2}(\tau)=\begin{cases}\dfrac{1}{N}\displaystyle\sum_{n=1}^{N-\tau} c_{1,n}^{*} c_{2,n+\tau} & 0\leqslant\tau<N\\ \dfrac{1}{N}\displaystyle\sum_{n=1}^{N+\tau} c_{1,n} c_{2,n-\tau}^{*} & -N<\tau<0\end{cases}\tag{2}$$

$$R_{\boldsymbol{s}_1, \boldsymbol{s}_2}(\tau)=\begin{cases}\dfrac{1}{N}\displaystyle\sum_{n=1}^{N-\tau} s_{1,n}^{*} s_{2,n+\tau} & 0\leqslant\tau<N\\ \dfrac{1}{N}\displaystyle\sum_{n=1}^{N+\tau} s_{1,n} s_{2,n-\tau}^{*} & -N<\tau<0\end{cases}\tag{3}$$

若 $0\leqslant\Delta<N$ 时, $(R_{\boldsymbol{c}_1, \boldsymbol{c}_2}(\tau)+R_{\boldsymbol{s}_1, \boldsymbol{s}_2}(\tau))=0$, 其中 $0\leqslant|\tau|\leqslant\Delta$, 则令 $\tau_w=\max\{\Delta\}$. 称 $(\boldsymbol{c}_1, \boldsymbol{s}_1)$和 $(\boldsymbol{c}_2, \boldsymbol{s}_2)$是最小双边 ZCW 为 $2\tau_w+1$的一对窗口互补码. 特别地, 若 $\tau_w=N-1$时, 称 $(\boldsymbol{c}_1, \boldsymbol{s}_1)$和 $(\boldsymbol{c}_2, \boldsymbol{s}_2)$为一对理想互补码.

定义 **3**　码字集合(组) S 由 M 个 LS码字构成, 码字集合 T 由 N 个 LS码字构成. 其中 $S=\{(\boldsymbol{c}_1, \boldsymbol{s}_1), (\boldsymbol{c}_2, \boldsymbol{s}_2), \cdots, (\boldsymbol{c}_M, \boldsymbol{s}_M)\}$, $T=\{(\boldsymbol{c}'_1, \boldsymbol{s}'_1), (\boldsymbol{c}'_2, \boldsymbol{s}'_2), \cdots, (\boldsymbol{c}'_N, \boldsymbol{s}'_N)\}$. 若 $\forall(\boldsymbol{c}_i, \boldsymbol{s}_i)\in S$ 和 $\forall(\boldsymbol{c}'_j, \boldsymbol{s}'_j)\in T$, $(\boldsymbol{c}_i, \boldsymbol{s}_i)$和 $(\boldsymbol{c}'_j, \boldsymbol{s}'_j)$都有最小的双边 ZCW $2\tau_w+1$, 则称码组 S 和码组 T 的最小双边 ZCW 为 $2\tau_w+1$. 其中 $i=1, 2, \cdots, M$; $j=1, 2, \cdots, N$.

2　新型 *DBL-CDMA* 地址码的构造

简明起见, 本文取 3×3维的扩展矩阵, 阐述新型 DBL-CDMA 地址组码构造方法.

第 **1**步　选取扩展矩阵

$\boldsymbol{A}=[a_{kn}]$, a_{kn}是非零的复数, $k, n=1, 2, 3$

第 **2**步　选取 C 部或 S 部长度为 N, 最小双边 ZCW 为 $2\tau_w+1$的所有基本 LS码字, 总共有 $M=\lfloor 2N/(\tau_w+1)\rfloor$个基本的 LS码字. 符号$\lfloor x\rfloor$表示对 x 向下取整. 其中第 i个 LS码字标记为 $(\boldsymbol{c}_i, \boldsymbol{s}_i)$, $i=1, 2, \cdots, M$. $\boldsymbol{c}_i$ 和 $\boldsymbol{s}_i$ 表示:

$$\boldsymbol{c}_i=(c_{i1}, c_{i2}, \cdots, c_{iN})\quad \boldsymbol{s}_i=(s_{i1}, s_{i2}, \cdots, s_{iN})$$

第 **3**步　对基本 LS零相关码字和扩展矩阵 $\boldsymbol{A}$ 做 kronecker积. 令 $\boldsymbol{G}_i$ 是第 i个 LS码字 $(\boldsymbol{c}_i, \boldsymbol{s}_i)$和扩展矩阵 $\boldsymbol{A}$ 做 kronecker积后生成的第 i组码字, $i=1, 2, \cdots, M$. $\boldsymbol{G}_i$ 表示如下:

$$\boldsymbol{G}_i=[\boldsymbol{g}_{i1}^{\mathrm{T}}\quad \boldsymbol{g}_{i2}^{\mathrm{T}}\quad \boldsymbol{g}_{i3}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}=[\boldsymbol{c}_i\otimes\boldsymbol{A}, \boldsymbol{s}_i\otimes\boldsymbol{A}]\tag{4}$$

符号 $\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}$ 表示对 $\boldsymbol{X}$ 做转置, 符号⊗表示 kronecker 积, $\boldsymbol{g}_{ij}$表示是第 $\boldsymbol{G}_j$ 组中的第 j个码字. 其中 $j=1, 2, 3$

第 **4**步　由第 3步, 构造出 M 组新型 DBL-CDMA 地址组码. 每组有 3个码字, 共有 3×M 个码字. 每个码字 C 部或 S 部的长度是 3×N. 把基本 LS码通过矩阵 kronecker积扩展生成的码字称为 DBL-CDMA 地址码.

3　新型 *DBL-CDMA* 地址码的性质

定理 **1**　若矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的元素满足 $\sum_{l=1}^{2} a_{kl}^{*} a_{k(l+1)}=0$, $k=1, 2, 3$, 则新的 DBL-CDMA 地址码码字的自相关值仅在偏移量 $\tau=\pm2$时不为零, 在其它 $\tau\neq\pm2$时间偏移处自相关函数恒为零.

证明　不失一般性, 证明 G_1 中的第一个码字 g_{11}的自相关特性. g_{11}的自相关函数记为 $R_{g_{11}}(\tau)$. 由式(4)

$$g_{11}=(c_{11}a_{11}, c_{11}a_{12}, c_{11}a_{13}, \cdots, c_{1N}a_{11}, c_{1N}a_{12}, c_{1N}a_{13}, s_{11}a_{11}, s_{11}a_{12}, s_{11}a_{13}, \cdots, s_{1N}a_{11}, s_{1N}a_{12}, s_{1N}a_{13})$$

当 $\tau>0$($\tau<0$证明类似), 令 $\tau=\tau_1\times 3+\tau_2$, 其中 τ_1, τ_2 都是正整数, 且 $0\leqslant\tau_1\leqslant N-1$, $0<\tau_2\leqslant 2$ 因此

$$R_{g_{11}}(\tau)=\sum_{m=1}^{N-\tau_1}c_{1m}^{*}c_{1(m+\tau_1)}\sum_{l=1}^{3-\tau_2}a_{1l}^{*}a_{1(l+\tau_2)}+\sum_{m=1}^{N-\tau_1}s_{1m}^{*}s_{1(m+\tau_1)}\sum_{l=1}^{3-\tau_2}a_{1l}^{*}a_{1(l+\tau_2)}=\sum_{l=1}^{3-\tau_2}a_{1l}^{*}a_{1(l+\tau_2)}\left(\sum_{m=1}^{N-\tau_1}c_{1m}^{*}c_{1(m+\tau_1)}+\sum_{m=1}^{N-\tau_1}s_{1m}^{*}s_{1(m+\tau_1)}\right)$$

下面分别讨论 $R_{g11}(\tau)$在不同 τ时的取值.

1) 由基本 LS码的性质, $(\boldsymbol{c}_1,\boldsymbol{s}_1)$ 是理想自互补码. 根据式 (1) 当 $\tau_1\geqslant 1$, 也即 $\tau\geqslant 3$ 时 $\left(\sum_{m=1}^{N-\tau_1}c_{1m}^{*}c_{1(m+\tau_1)}+\sum_{m=1}^{N-\tau_1}s_{1m}^{*}s_{1(m+t_1)}\right)=0$ 此时 $R_{g_{11}}(\tau)=0$

2) 当 $\tau=1$ 时, $R_{g11}(1)=\sum_{l=1}^{2}a_{1l}^{*}a_{1(l+1)}\cdot\left(\sum_{m=1}^{N}c_{1m}^{*}c_{1m}+\sum_{m=1}^{N}s_{1m}^{*}s_{1m}\right)$. 若矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的元素满足 $\sum_{l=1}^{2}a_{1l}^{*}a_{1(l+1)}=0$, 则 $R_{g_{11}}(1)=0$

3) 当 $\tau=2$时, 此时 $R_{g_{11}}(2)\neq 0$, 证明类似.

证毕

定理 **2** 若码长为 $2N$ 的基本 LS码字 $(\boldsymbol{c}_v,\boldsymbol{s}_v)$ 和 $(\boldsymbol{c}_u,\boldsymbol{s}_u)$的双边 ZCW 为 $2\tau_w+1$, 则 $\boldsymbol{G}_v$ 和 $\boldsymbol{G}_u$ 中码字的最小互相关双边 ZCW 为 $\min(6\tau_w+1,6N-1)$. 其中 $v\neq u$.

证明 记 $\boldsymbol{g}_{u,s}$ 和 $\boldsymbol{g}_{u,j}$ 的互相关函数为 $R_{g_{u,s}g_{u,j}}(\tau)$. 其中 $s,j=1,2,3$.

当 $\tau\geqslant 0$($\tau<0$证明类似), 令 $\tau=\tau_1\times 3+\tau_2$, 其中 τ_1, τ_2 都是正整数, 且 $0\leqslant\tau_1\leqslant N-1$, $0\leqslant\tau_2\leqslant 2$ 所以

$$R_{g_{u,s}g_{u,j}}(\tau)=\sum_{m=1}^{N-\tau_1}c_{um}^{*}c_{v(m+\tau_1)}\sum_{l=1}^{3-\tau_2}a_{sl}^{*}a_{j(l+\tau_2)}+\sum_{m=1}^{N-\tau_1}s_{um}^{*}s_{v(m+\tau_1)}\sum_{l=1}^{3-\tau_2}a_{sl}^{*}a_{j(l+\tau_2)}=\sum_{l=1}^{3-\tau_2}a_{sl}^{*}a_{j(l+\tau_2)}\left(\sum_{m=1}^{N-\tau_1}c_{um}^{*}c_{v(m+\tau_1)}+\sum_{m=1}^{N-\tau_1}s_{um}^{*}s_{v(m+\tau_1)}\right)$$

因为 $(\boldsymbol{c}_v,\boldsymbol{s}_v)$和 $(\boldsymbol{c}_u,\boldsymbol{s}_u)$ 的双边 ZCW 为 $2\tau_w+1$, 所以当 $\tau_1\leqslant\tau_w$ 时, $\left(\sum_{m=1}^{N-\tau_1}c_{um}^{*}c_{v(m+\tau_1)}+\sum_{m=1}^{N-\tau_1}s_{um}^{*}s_{v(m+\tau_1)}\right)=0$ 又因为 $\boldsymbol{g}_{u,s}$和 $\boldsymbol{g}_{u,j}$最大的双边 ZCW 为 $6N-1$, 所以 $\boldsymbol{g}_{u,l}$和 $\boldsymbol{g}_{u,k}$ 的最小双边 ZCW 为 $\min(6\tau_w+1,6N-1)$.

证毕

定理 **3** 若扩展矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的元素满足 $\sum_{l=1}^{3}a_{sl}^{*}a_{jl}=0$时, 则同一组内不同地址码之间的互相关函数仅在 $\tau=\pm 1$和 $\tau=\pm 2$处不为零, 在 τ取其它值时均为零. 其中 $s,j=1,2,3$.

证明 不失一般性, 证明 $\boldsymbol{G}_1$ 中不同码字的互相关特性. 设 $\boldsymbol{g}_{1,s}$和 $\boldsymbol{g}_{1,j}$ 的互相关函数为 $R_{g_{1,s}g_{1,j}}(\tau)$, 其中 $s,j=1,2,3$.

当 $\tau\geqslant 0$($\tau<0$证明类似), 令 $\tau=\tau_1\times 3+\tau_2$, 其中 τ_1, τ_2 都是正整数, 且 $0\leqslant\tau_1\leqslant N-1$, $0\leqslant\tau_2\leqslant 2$ 所以

$$R_{g_{1,s}g_{1,j}}(\tau)=\sum_{m=1}^{N-\tau_1}c_{1m}^{*}c_{1(m+\tau_1)}\sum_{l=1}^{3-\tau_2}a_{sl}^{*}a_{j(l+\tau_2)}+\sum_{m=1}^{N-\tau_1}s_{1m}^{*}s_{1(m+\tau_1)}\sum_{l=1}^{3-\tau_2}a_{sl}^{*}a_{j(l+\tau_2)}=\sum_{l=1}^{3-\tau_2}a_{sl}^{*}a_{j(l+\tau_2)}\left(\sum_{m=1}^{N-\tau_1}c_{1m}^{*}c_{1(m+\tau_1)}+\sum_{m=1}^{N-\tau_1}s_{1m}^{*}s_{1(m+\tau_1)}\right)$$

下面分别讨论 $R_{g_{1,s}g_{1,j}}(\tau)$在不同的 τ时的取值.

1) 当 $\tau_1\geqslant 1$, 即 $\tau\geqslant 3$时 $\left(\sum_{m=1}^{N-\tau_1}c_{1m}^{*}c_{1(m+\tau_1)}+\sum_{m=1}^{N-\tau_1}s_{1m}^{*}s_{1(m+\tau_1)}\right)=0$ 此时 $R_{g_{1,s}g_{1,j}}(\tau)=0$

2) 当 $\tau=0$时, 只有扩展矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的元素满足 $\sum_{l=1}^{3}a_{sl}^{*}a_{jl}=0$时, $R_{g_{1,s}g_{1,j}}=0$

3) 当 $\tau=1$, 若式 (2) 成立, 即 $\sum_{l=1}^{3}a_{sl}^{*}a_{jl}=0$ 时, $R_{g_{1,s}g_{1,j}}(1)\neq 0$

4) 当 $\tau=2$时, $R_{g_{1,s}g_{1,j}}(2)\neq 0$ 证毕

推论 **1** 上述扩展矩阵是 3×3维的, 可将扩展矩阵推广到更高的维数, 从而得出类似的性质.

需要指出, 设计新型 DBL-CDMA 地址码的关键是扩展矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的构造. 基本 LS码和矩阵 kronecker积相当于对基本 LS码的码片进行不同角度的旋转.

4 新型地址码举例

由上述证明, 若扩展矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的元素满足 $\sum_{l=1}^{3}a_{sl}^{*}a_{jl}=0$和 $\sum_{l=1}^{2}a_{sl}^{*}a_{s(l+1)}=0$两个等式, 则能够构造出满足上述性质的地址码. 其中 $s=1,2,3$

以下举实例说明新型地址码的设计.

1) 根据上述原则设计出扩展矩阵:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1 & 1 & -1\\ 1 & \mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2}{3}\pi} & -\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2}{3}\pi}\\ 1 & \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2}{3}\pi} & -\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2}{3}\pi}\end{bmatrix}$$

2) 选取所有 C 部和 S 部长度为 8, 双边 ZCW 为 3的基本 LS码字.

3) 对基本的 LS码字和扩展矩阵 $\boldsymbol{A}$ 做 kronecker积. 这样生成 8组 DBL-CDMA地址码, 每一组有 3个码字, 共有 24个码字, 每个码字的长度是 48个 chip.

图 1上半部分是组 1中第一个码字 g_{11}的自相关值. g_{11}的自相关值仅在时间偏移 $\tau=\pm2$时不为零, 在其它时间偏移处都为零. 图 1下半部分是 g_{11}和组 1第二个码字 g_{12}的互相关值. g_{11}和 g_{12}的互相关值仅在时间偏移 $\tau=\pm1$和 $\tau=\pm2$时不为零, 在其它时间偏移处都为零. 图 2上半部分是 g_{11}和组 2内的第一个码字 g_{21}的互相关值. 可见, 这两个码字是完全理想互补的. 实际上组 1内的任意一个码字都和组 2内的任意一个码字完全理想互补. 图 2下半部分是 g_{11}和组 4内的第一个码字 g_{41}的互相关值. 可见, g_{11}和 g_{41}的最小双边零相关窗口宽度是 19.

图 3上半部分是 g_{11}和组 6内的第一个码字 g_{61}的互相关值. 可见, g_{11}和 g_{61}的最小双边零相关窗口宽度是 7. 图 3下半部分是 g_{11}和组 8内的第一个码字 g_{81}的互相关值. 可见, g_{11}和 g_{81}的最小双边零相关窗口宽度也是 7.

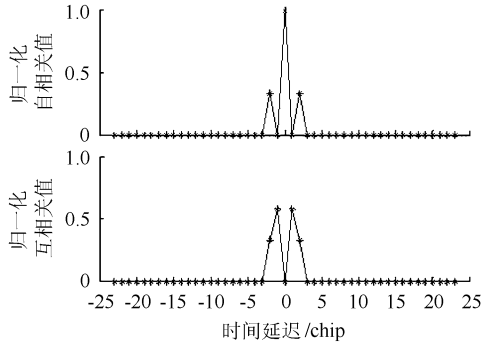

图 1　g_{11}的自相关值及 g_{11}和 g_{12}的互相关值

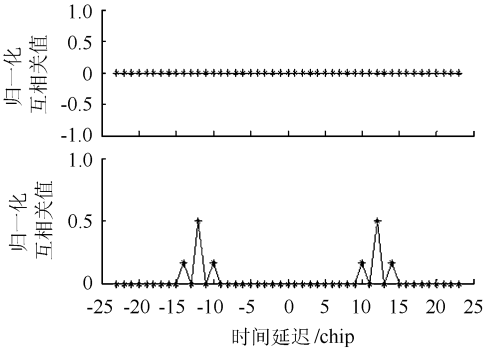

图 2　g_{11}和 g_{21}, g_{41}的互相关值

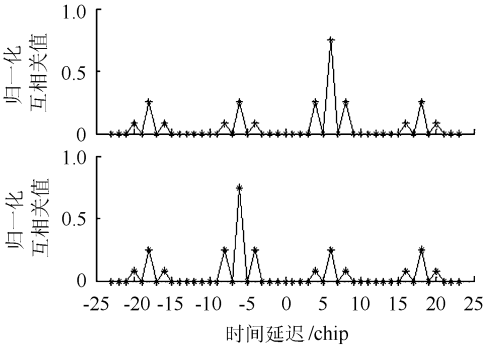

图 3　g_{11}和 g_{61}, g_{81}的互相关值

综上, 得出组 1和组 2是完全理想互补的; 组 1和组 3, 组 4最小双边零相关窗是 19; 组 1和组 5、组 6、组 7、组 8最小双边零相关窗是 7. 其它码字的相关特性和 g_{11}的相关特性类似.

5　新型地址码和基本 *LS* 码字比较

比较表 1、表 2, 码长为 64的基本 LS码在最小零相关窗为 [- 3 3]时, 只有 16个码字, 每个码字只有 1个理想互补码. 新型 DBL-CDMA地址码在码长为 48, 最小零相关窗为 [- 3 3]时, 有 24个码字, 每个码字有 3个理想互补码. 若采用 4×4扩展矩阵, 则新型地址码在码长为 64, 最小零相关窗为 [- 4 4]时, 有 32个码字, 每个码字有 4个理想互补码. 而根据理论界 [7], 码长为 64, 最小零相关窗为 [- 4 4]时, 最多有 13个基本 LS码字. 可见, 保持和基本 LS码码长一样的条件下, 新型 DBL-CDMA地址码增加了可用码字的数量和扩大了最小零相关窗, 且增加了每个码字的理想互补码的个数. 保持和基本 LS码最小零相关窗一样的条件下, 新型 DBL-CDMA地址码增加了码字的数量和每个码字的理想互补码的数量, 并降低了码字的长度.

当然, 新型 DBL-CDMA地址码上述特性是牺牲了码字的自相关值和组内码字间的互相关值得到的. 码字的自相关值和组内码字间的互相关值仅在几个时间延迟处有附峰.

表 **1**　基本 **LS**码字列表

码字长度 / chip	码的总数	每个码字理想互补码的个数	组数	码数 /组	组间最小零相关窗口宽度
64	16	1	16	1	[- 3 3]
64	≈ 13	1	≈ 13	1	[- 4 4]
128	32	1	32	1	[- 3 3]
128	≈ 26	1	≈ 26	1	[- 4 4]

表 **2**　新型 **DBL-CDMA** 地址码码字列表

扩展矩阵的维数	码字长度 / chip	码的总数	每个码字的理想互补码个数	组数	码数 /组	组间最小零相关窗口宽度
3×3	48	24	3	8	3	[- 3 3]
3×3	96	48	3	16	3	[- 3 3]
4×4	64	32	4	8	4	[- 4 4]
4×4	128	64	4	16	4	[- 4 4]

(下转第 **1134**页)

内磁流体发生器采用五方程模型进行了三维数值模拟, 并通过调节其磁作用数以满足准一维流路设计的进气道外形. 研究表明, 内磁流体发生器可以有效地减小高速气体的总焓, 并将其转化为电能. 磁流体进气道最小出口流动均匀参数可以作为判别内发生器最优磁作用数的准则, 而在该磁作用数下, 磁流体进气道出口的马赫数、总焓和总温与常规超燃冲压发动机进气道相比均有所降低, 增压比提高, 但磁流体进气道出口的平均温度和流动均匀参数却略有增大. 因此, 对进气道引入磁流体流动控制技术不仅可以将高温高马赫数来流中的部分能量转化为电能, 还有利于提高燃烧室的热效能.

参考文献 (References)

[1] Gurijanov E P, Harsha P T. AJAX: new directions in hypersonic technology[R]. AIAA-96-4609, 1996

[2] Kuranov A L, Sheikin E G. Magnetohydrodynamic control on hypersonic aircraft under Ajax concept[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2003, 40(2): 174-182

[3] Litchford R J, Cole J W, Bityurin V A, et al. Thermodynamic cycle analysis of magnetohydrodynamic-bypass hypersonic air-breathing engines[J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(2): 477-480

[4] Bityurin V A. A feasibility study and experimental evaluation on MHD acceleration for application to advanced propulsion and hypervelocity ground testing[R]. AIAA-2000-2301, 2000

[5] Kuranov A L, Sheikin E G. MHD control on hypersonic aircraft under AJAX concept-possibilities of MHD generator[R]. AIAA-2002-0490, 2000

[6] Macheret S O, Shneider M N, Miles R B. Magnetohydrodynamic control of hypersonic flows and scramjet inlets using electron beam ionization[J]. AIAA Journal, 2002, 40(1): 74-81

[7] Hunt J C R. Magnetohydrodynamic flow in rectangular ducts[J]. Journal of Fluid Mech, 1960, 21: 577-590

[8] Steal A. Numerical simulation of liquid-metal MHD flows in rectangular ducts[J]. Journal of Fluid Mech, 1990, 216: 161-191

[9] Ishikawa M, Itoh K. Three dimensional constricted electric current near anode and cathode of faraday MHD generator[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44: 2111-2124

[10] 吕浩宇, 李椿萱, 董海涛, 等. Hal效应对三维磁流体发生器的影响[J]. 力学学报, 2008, 40(3): 306-314
Lü Haoyu, Lee Chunhian, Dong Haitao, et al. Hall effects in three-dimensional MHD generator[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008, 40(3): 306-314(in Chinese)

[11] Lee C H, Lu H. Quasi-one-dimensional parametric study for MHD generator in MHD bypass scramjet system[R]. AIAA-2007-0644, 2007

[12] Dong H, Zhang L, Lee C. High order discontinuity decomposition entropy condition schemes for Euler equations[J]. CFD Journal, 2002, 10(4): 563-568

(责任编辑: 刘登敏)

(上接第 1129页)

6 结束语

本文将扩展矩阵推广到复数域, 设计了一种新型的 DBL-CDMA 地址码. 新的地址码相对于基本 LS码, 保持码长一致的前提下增加了零相关窗口宽度、码字的数量和理想互补码的个数. 保持和基本 LS码最小零相关窗一样的条件下, 新型地址码增加了码字的数量和每个码字的理想互补码的个数, 降低了码字的长度. 码字的自相关值和组内码字间的互相关值仅在几个时间延迟处有附峰. 这类新码字的在多径瑞利信道下的误码性能, 以及系统同步性能将在未来的工作中进行研究与仿真.

参考文献 (References)

[1] Golay M J E. Complementary series[J]. IRE Trans Inform. Theory, 1961, IT-7: 82-87

[2] Fan P Z, Suehiro, Kuroyanagi, et al. A class of binary sequences with zero correlation zone[J]. Electronics Letters, 1999, 35: 777-779

[3] Li D B. A spread spectrum multiple access coding method with zero correlation window [P]. PCT/CN00/00028. 2000

[4] 李道本. 分组零相关窗码分技术: 中国, PCT/CN2006/000947[P]. 2006
Li Daoben, Grouped multiple access codes with zero correlation window: China, PCT/CN2006/000947[P]. 2006(in Chinese)

[5] 徐绍君, 李道本. 多径衰落信道下的扩频码设计与联合检测[J]. 通信学报, 2004, 25(4): 15-22
Xu Shaojun, Li Daoben. Spreading code design and joint detection in multi-path fading channels[J]. Journal on Communicaitons, 2004, 25(4): 15-22 (in Chinese)

[6] 杨星, 李道本, 邹永忠. 一类新的 LS码及其构造方法[J]. 北京邮电大学学报, 2006, 29(3): 103-106
Yang Xing, Li Daoben, Zou Yongzhong. A new kind of LS code and its construct method[J]. Journal of BeiJing University of Posts and Telecommunications, 2006, 29(3): 103-106 (in Chinese)

[7] Tang X H, Fan P Z. Bounds on aperiodic and odd correlations of spreading sequences with low and zero correlation zone[J]. Electronics Letters, 2001, 37(19): 1201-1203

(责任编辑: 娄 嘉)