

ZC-OFDM 信号的分集特性与应用研究

曾瑞琪, 骆胜阳, 刘方正

(国防科技大学电子对抗学院电子对抗信息处理重点实验室, 合肥, 230037)

摘要 分布式网络化电子信息系统的发射信号需要满足较强分集特性的要求, 相同长度、不同根值的 ZC 序列之间的分集特性由其根值本身及其根值差值决定。通过 ZC 序列与 ZC-OFDM 信号的采样序列之间的同构性, 对 ZC-OFDM 信号的分集特性进行了研究, 结合 ZC-OFDM 信号的分集特性以及分布式网络化电子信息系统的特性, 提出了最优有效采样长度计算算法, 该算法解决了在分布式网络系统布站数一定以及发射信号带宽有限、时宽有限的情况下, 如何确定发射信号的有效采样长度使得各个发射站信号的分集特性能够达到最强的问题。结合常规探测信号的时宽、带宽取值范围和最优有效采样长度计算算法, 对波形的参数进行了设计, 对其在分布式网络化电子信息系统的信号处理效果进行了仿真。仿真结果表明, 不同根值的 ZC-OFDM 信号具有良好的分集特性, 能够使得分布式网络化电子信息系统在回波接收处理时对各个发射站发射信号的回波信号进行有效的分离。

关键词 ZC 序列; ZC-OFDM 信号; 分集; 分布式网络化电子信息系统

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.06.007

中图分类号 TN957.51 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)06-0039-08

Research on Diversity Characteristics and Application of ZC Sequence Code Modulated OFDM Signal Waveform

ZENG Ruiqi, LUO Shengyang, LIU Fangzheng

(Electronic Countermeasure Signal Processing Key Laboratory, College of Electronic Countermeasure, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: The transmitted signal of a distributed networked system needs to meet the requirements of strong diversity characteristics. The diversity characteristics between ZC sequences of the same length and different root values are determined by the root value itself and its root value difference. In this paper, the diversity characteristics of ZC-OFDM signals are studied by the isomorphism between the ZC sequence and the sampling sequence of ZC-OFDM signals. Combining the diversity characteristics of ZC-OFDM signals and the characteristics of distributed networked systems, an optimal effective sampling length calculation algorithm is proposed. The algorithm is used to solve how the effective sampling length of the transmitted signal is determined so that the diversity characteristics of them can reach the strongest when the number of distributed network systems is limited as well as the bandwidth and time width of the transmitted signal. Combined with the time width, bandwidth range and optimal effective sampling length calculation al-

收稿日期: 2018-09-07

基金项目: 国家“863”计划(17-H863-04 ZT-003-002-01)

作者简介: 曾瑞琪(1994—), 男, 四川彭州人, 硕士生, 主要从事雷达波形设计研究。E-mail: 490014719@qq.com

引用格式: 曾瑞琪, 骆胜阳, 刘方正. ZC-OFDM 信号的分集特性与应用研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(6): 39-46.
ZENG Ruiqi, LUO Shengyang, LIU Fangzheng. Research on Diversity Characteristics and Application of ZC Sequence Code Modulated OFDM Signal Waveform[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(6): 39-46.

gorithm of conventional detection signals, the parameters of the waveform are designed, and the signal processing effect of the distributed network system is simulated. The simulation results show that the ZC-OFDM signals with different root values are characterized by enabling the distributed networked system to effectively separate the echo signals of the signals transmitted by each transmitting station during the echo receiving process.

Key words: ZC sequence; ZC-OFDM signal; diversity; characteristic distributed networked system

ZC序列具有恒包络性、低峰均比性、良好的自相关特性、傅里叶不变性等优良特性,被广泛地应用于扩频通信领域,如被应用于同步码分多址接入和多载波码分多址接入、正交频分复用通信系统的信道估计^[1]、同步和扩频码等关键技术领域^[2]。有大量文献针对ZC序列的特性与相关应用进行了研究,文献[3]证明了ZC序列的循环自相关函数呈现非完全匹配情况下相关值为零的特性;文献[4]证明了ZC序列经过傅里叶变换和傅里叶逆变换后仍是ZC序列的特性;文献[5]证明了序列的恒包络特性。文献[6~7]研究了ZC序列用做OFDM通信做同步序列的同步性能,比较了ZC序列和 m 序列、PN序列以及通信符号CP做同步序列的同步性能,是对ZC序列良好自相关性的应用。分布式网络化电子信息系统采用多发多收、收发分置的方式进行工作^[8-9],信号或序列的分集特性是指具有相同样式的信号或序列,经过相同的信号处理过程之后其结果呈现的差异性,这种差异性越大则分集特性越大,差异性越小则分集特性越小。研究相同长度不同根值的ZC序列的分集特性对于区分各个发射站的信号有重要的意义。文献[10]提出并证明了ZC序列的部分分集特性,即在序列长度为奇数的情况下,2个同样长度但不同根值的ZC序列若其根值差的绝对值跟序列长度 N 互质,则2个ZC序列的互相关值为 \sqrt{N} 。而关于ZC序列的序列长度为偶数的情况、关于不同根值ZC序列根值差的绝对值和长度 N 有除1以外其他公约数的情况,这2种情况下的分集特性还没有相关研究。本文在现有的研究基础上进一步较为完整地研究了ZC序列的分集特性,进而利用ZC序列的傅里叶不变特性研究了ZC-OFDM信号的分集特性。

1 ZC-OFDM信号的分集特性研究

ZC序列的定义^[10]如下:

$$Z_{\mu}(k) = \begin{cases} W_N^{\mu(k^2/2+qk)}, & N \bmod 2=0 \\ W_N^{\mu(k(k+1)/2+qk)}, & N \bmod 2=1 \end{cases},$$

$$k=0,1,\dots,N-1 \quad (1)$$

式中: $W_N = e^{-j2\pi/N}$, N 为序列的长度; $\mu = N^+$ 为序列的根序列(或者称为根值), μ 和 N 满足 $\gcd(\mu, N) = 1$ 。式(1)可改写为如下形式:

$$Z_{\mu}(k) = e^{-j\pi\mu k(k+c_f+1q)/N} = W_N^{\frac{\mu k(k+c_f+2q)}{2}},$$

$$k=0,1,\dots,N-1 \quad (2)$$

式中: $c_f = N \bmod 2$, $q \in Z$ 为参数。

1.1 ZC-OFDM信号与ZC序列的关系

ZC-OFDM信号即ZC序列调制的OFDM信号。OFDM信号的调制方法提供了一种在频域上设计信号波形的办法。OFDM信号的数学表达式为:

$$Q(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \Phi_{f_k}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{j2\pi f_k t} =$$

$$\sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{j2\pi(f_0+k\Delta f)t} \quad (3)$$

式中: $f_k = f_0 + k\Delta f$, f_0 为起始频率, Δf 为频率间隔。欲表示信号的采样序列,对式(3)以 $T_s(1/f_s)$ 为间隔周期进行采样,令 $t = nT_s$,有:

$$x(nT_s) = \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{j2\pi(f_0+k\Delta f)nT_s} \quad (4)$$

若令起始频率 $f_0 = 0$,则频率间隔为 $\Delta f = 1/Nt_s = f_s/N$,即频率间隔为采样频率的 $1/N$,则得OFDM信号的采样序列表达式为:

$$Q_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{j\frac{2\pi}{N}kn} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k W_N^{-kn} \quad (5)$$

式(3)~(5)表达了调制序列 x_k 与OFDM信号的采样序列 Q_n 之间的离散傅里叶变换关系,通过此种关系可以得出:调制序列 x_k 的特性,即OFDM信号的频域特性。

ZC序列有一条重要的性质就是傅里叶不变性,利用傅里叶不变性可得到ZC-OFDM信号和ZC序列本身之间的关系,从而简化对ZC-OFDM信号分集特性的研究过程。ZC序列的傅里叶不变性是指ZC序列经离散傅里叶变换和离散傅里叶逆变换后仍然是ZC序列的特性。对ZC序列 $Z_{\mu}(k) = W_N^{\frac{\mu k(k+c_f+2q)}{2}}$, $k=0,1,\dots,N-1$,进行傅里叶变换有:

$$z_{\mu}(n) = \text{DFT}[Z_{\mu}(k)] = \sum_{k=0}^{N-1} Z_{\mu}(k) W_N^{kn},$$

$$n = 0,1,\dots,N-1 \quad (6)$$

注意到^[11]:

$$Z_{\mu}(k)W_N^{kn} = W_N^{\frac{\mu k(k+c_f+2q)}{2}} W_N^{kn} = W_N^{\frac{\mu k(k+c_f+1q+2kn)}{2}} = e^{j\pi(\mu \times (\mu^{-1}n)(\mu^{-1}n+c_f+2q))N} e^{-j\pi[\mu(k+\mu^{-1}n)(k+\mu^{-1}n+c_f+2q)]N} \quad (7)$$

式中: μ^{-1} 为 μ 关于1模 N 的乘法逆元,即满足 $\mu \times \mu^{-1} \equiv 1 \pmod N$ 。因此 ZC 序列 $Z_{\mu}(k)$ 的傅里叶变换可写为^[12]:

$$\begin{aligned} z_{\mu}(n) &= \sum_{k=0}^{N-1} Z_{\mu}(k)W_N^{kn} = \\ &= W_N^{\frac{-\mu \times (\mu^{-1}n) \times (\mu^{-1}n+c_f+2q)}{2}} \times \sum_{k=0}^{N-1} W_N^{\frac{\mu \times (k+\mu^{-1}n) \times (k+\mu^{-1}n+c_f+2q)}{2}} = \\ &= Z_{\mu}^*(\mu^{-1}n) \times \sum_{k=0}^{N-1} Z_{\mu}(k+\mu^{-1}n) = \\ &= Z_{\mu}^*(\mu^{-1}n) \times \sum_{k=0}^{N-1} Z_{\mu}(k) = \\ &= Z_{\mu}^*(\mu^{-1}n) \times z_{\mu}(0), n = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (8)$$

有:

$$x_{\mu}^*[\mu^{-1}n] = x_{\mu^{-1}}^*[n]W_N^{-(1-\mu^{-1})n} \quad (9)$$

所以有:

$$z_{\mu}(n) = Z_{\mu^{-1}}^*[n]W_N^{(1-\mu^{-1})n} \times Z_{\mu}(0), n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (10)$$

结合式(6)~(10)可得 ZC 序列经过傅里叶变化后仍然是 ZC 序列,且 ZC 序列的根值 μ^{-1} 与原 ZC 序列的根值 μ 满足 $\mu \times \mu^{-1} \equiv 1 \pmod N$ 。同理,ZC 系列经过逆里叶变换也有同样的性质。表 1 给出了在 $N=67, c_f+2q=1$ 情况下,ZC 序列的部分根值和其对应的傅里叶变化后的根值对应情况。

表 1 ZC 序列根值对应表

原始根值 μ	7	13	17	25	33	47
傅里叶变换后根值 μ^{-1}	19	36	51	8	2	57

根据 ZC 序列的傅里叶不变性以及 OFDM 信号中调制序列和 OFDM 信号采样序列之间的关系可得:

ZC-OFDM 信号的采样序列仍然是 ZC 序列,ZC 序列的特性即 ZC-OFDM 信号的时域特性和频域特性。因此,在下文中通过研究 ZC 序列的分集特性即可得到 ZC-OFDM 信号的分集特性。

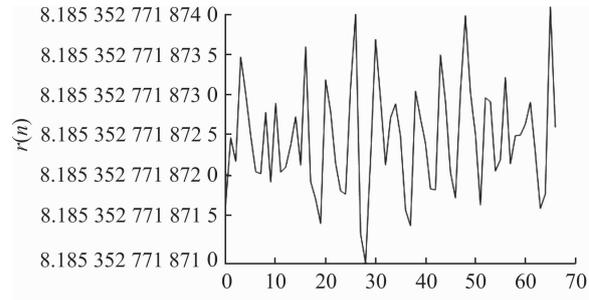
1.2 不同根值 ZC 序列之间的分集特性

信号的分集特性是一种反映 2 个同类信号之间不同程度的特性。ZC-OFDM 信号的分集特性指的是 2 个相同序列长度但不同根值 ZC-OFDM 信号之间的相关性和 2 个根值相关的特性。根据 1.1 中的结论,可以直接通过研究不同根值 ZC 序列之间的分集特性来研究不同根值 ZC-OFDM 信号的分集特性。定义根值为 μ_1, μ_2 的 2 个 ZC 序列的互相关函数如下:

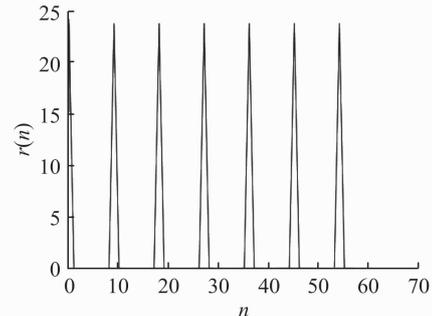
$$r_0^{*\mu_1, \mu_2} = \left| \sum_{k=0}^{N-1} Z_{\mu_1}(k)Z_{\mu_2}^*(k) \right|$$

$$r_n^{*\mu_1, \mu_2} = \sum_{k=0}^{N-1-n} Z_{\mu_1}(k)Z_{\mu_2}^*(k+n) + \sum_{k=N-n}^{N-1} Z_{\mu_1}(k)Z_{\mu_2}^*(k+n-N), n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (11)$$

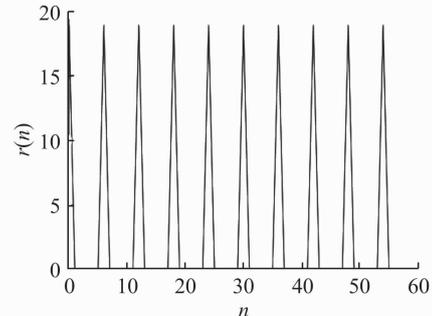
根据公式推导可得以下 4 条性质,4 条性质的仿真图依次为图 1(a)~(d)。



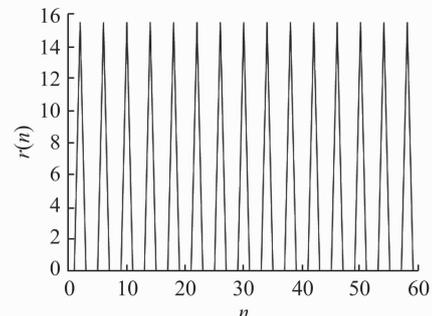
(a) $N=67, C_f+2q=1, u_1=11, u_2=7$, ZC 序列互相关函数



(b) $N=63, C_f+2q=1, u_1=17, u_2=8$, ZC 序列互相关函数



(c) $N=60, C_f+2q=1, u_1=17, u_2=11$, ZC 序列互相关函数



(d) $N=60, C_f+2q=1, u_1=11, u_2=7$, ZC 序列互相关函数

图 1 不同根值 ZC 序列的分集特性

1)若 N 与 $|\mu_1 - \mu_2|$ 互质(根据 ZC 序列的定义, N 与 μ_1, μ_2 是互质的,因此 N 与 $|\mu_1 - \mu_2|$ 互质则 N 必为奇数),则:

$$\begin{aligned} |r_0^{*\mu_1, \mu_2}| &= \sqrt{N} \\ |r_n^{*\mu_1, \mu_2}| &\approx \sqrt{N} \end{aligned} \quad (12)$$

2)若 N 是奇数,假设 N 与 $|\mu_1 - \mu_2|$ 有最大公约

数 δ , 则:

$$|r_n^{*\mu_1, \mu_2}| = \sqrt{\delta N}$$

$$|r_n^{*\mu_1, \mu_2}| = \begin{cases} \sqrt{\delta N}, & n = k\delta, k = 1, 2, \dots, \frac{N}{\delta} \\ 0, & n \neq k\delta \end{cases} \quad (13)$$

3) 若 N 是偶数, 假设 N 与 $|\mu_1 - \mu_2|$ 有最大公约数 $\delta \neq 1$, 且 $\frac{N}{\delta}$ 为偶数, 则:

$$|r_0^{*\mu_1, \mu_2}| = \sqrt{\delta M}$$

$$|r_n^{*\mu_1, \mu_2}| = \begin{cases} \sqrt{\delta M}, & n = k\delta, k = 1, 2, \dots, \frac{M}{\delta} \\ 0, & n \neq k\delta \end{cases} \quad (14)$$

4) 若 N 是偶数, 假设 N 与 $|\mu_1 - \mu_2|$ 有最大公约数 $\delta \neq 1$, 且 $\frac{N}{\delta}$ 为奇数, 则:

$$|r_0^{*\mu_1, \mu_2}| = 0$$

$$|r_n^{*\mu_1, \mu_2}| = \begin{cases} \sqrt{\delta M}, & n = k\delta - \delta/2, k = 1, 2, \dots, \frac{M}{\delta} \\ 0, & n \neq k\delta - \delta/2 \end{cases} \quad (15)$$

结合前文可得如下结论: 序列长度为 N , 根值为 μ_1, μ_2 2 个 ZC-OFDM 信号的采样序列是以 μ_1^{-1} 和 μ_2^{-1} (μ_1^{-1} 和 μ_2^{-1} 分别是 μ_1 和 μ_2 的乘法逆元) 为根值的 ZC 序列。2 个序列的循环互相关值的最大值比相同根值的 ZC 序列自相关值缩小 $\sqrt{N/\delta}$ 倍 (δ 为 N 与 $|\mu_1^{-1} - \mu_2^{-1}|$ 的最大公约数 δ)。定义不同根值序列之间的分集特性值 ξ_{μ_1, μ_2} 为: 序列长度一定的情况下, 序列的自相关值和不同根值序列的循环互相关值的最大值的比值, 即:

$$\xi_{\mu_1, \mu_2} = \frac{\max(r_n)}{\max(r_n^{*\mu_1, \mu_2})} \quad (16)$$

由以上性质可知, 若可选取适当的 μ_1, μ_2 使得 δ 取最小值即 $\delta = 1$, 则此时 ξ_{μ_1, μ_2} 取最小值为 \sqrt{N} 。

2 ZC-OFDM 信号波形的分集特性应用

分布式网络化电子信息系统工作方式见图 2。

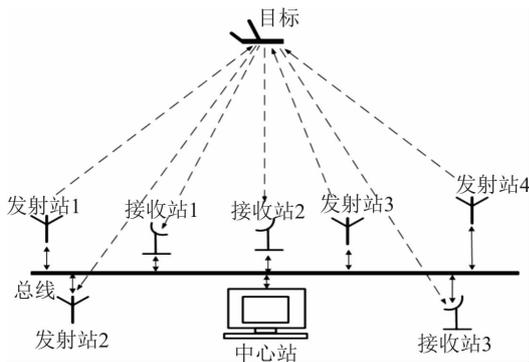


图 2 分布式网络化电子信息系统的工作方式
从图中可以看出, 分布式网络化电子信息系统

的各发射站和接收站分离工作, 对目标进行探测时, 多部发射站在网络中心站的指挥下发射探测信号, 各接收站需同时接收各个发射站的信号。

通过文献[13~15]可知若假设发射站位置信息为 $T_i(x_{T_i}, y_{T_i}, z_{T_i}) (i=1, 2, \dots, n)$, 接收站位置信息为 $R_l(x_{R_l}, y_{R_l}, z_{R_l}) (l=1, 2, \dots, m)$, 目标位置信息为 $M(x, y, z)$, r_{T_i} 为目标到发射站 T_i 的距离, r_{R_l} 为目标到接收站 R_l 的距离, $\rho_{R_l T_i}$ 为目标到发射站 T_i 和到接收站 R_l 的距离和, φ_{R_l} 为接收站天线波束的水平夹角, ε_{R_l} 为发射站天线波束的垂直夹角, 则通过式(17)可解出目标位置:

$$\begin{cases} r_{T_i} = \sqrt{(x-x_{T_i})^2 + (y-y_{T_i})^2 + (z-z_{T_i})^2}, (i=1, 2, \dots, n) \\ r_{R_l} = \sqrt{(x-x_{R_l})^2 + (y-y_{R_l})^2 + (z-z_{R_l})^2} \\ \rho_{R_l T_i} = r_{R_l} + r_{T_i} (i=1, 2, \dots, n; l=1, 2, \dots, m) \\ \varphi_{R_l} = \arctan \frac{y-y_{R_l}}{x-x_{R_l}} \\ \varepsilon_{R_l} = \arctan \frac{z-z_{R_l}}{\sqrt{(x-x_{R_l})^2 + (y-y_{R_l})^2}} \end{cases} \quad (17)$$

从式(17)可以看出, 要求解目标位置, 接收站必须通过信号检测将目标、发射站、接收站三者进行有效的关联, 这就要求不同发射站不同的发射波形在经过目标发射后在接收站得到有效的区分, 即要求发射站的发射波形有良好的分集特性。ZC-OFDM 信号具有良好的探测特性可作为常规的雷达探测信号, 其模糊函数^[16]以及距离分辨率和速度分辨率见图 3。

在此基础上, 又有第 1.2 节中关于 ZC-OFDM 信号的分集特性的结论, 可以看出 ZC-OFDM 信号作为探测波形既具有良好的探测特性又具有良好的分集特性, 能够满足分布式网络化电子信息系统的工作要求。下面通过设置具体的探测信号参数对 ZC-OFDM 信号作为分布式网络化电子信息系统的探测波形的分集性能进行具体的研究。

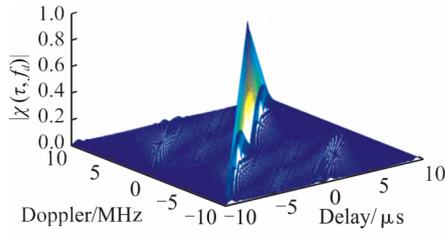
由于本文是研究 ZC-OFDM 信号作为分布式网络化电子信息系统的探测波形的分集特性, 因此现假设共有 4 个分布式网络化电子信息系统发射站 T_1, T_2, T_3, T_4 , 一个接收站 R , 每个发射站发射载频为 f_0 , 脉宽为 T_p , 带宽为 B , 调制序列长度为 N , 根值分别为 $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ 的 ZC 序列调制的 OFDM 信号波形, 则 4 个发射站的发射信号波形可表示为:

$$S_1(t) = \sum_{k=0}^{N-1} W_N^{\frac{\mu_1 k(k+1)}{2}} e^{j2\pi(f_0 + k\Delta f)t} \cdot \text{Rect}\left(\frac{t}{T_p}\right),$$

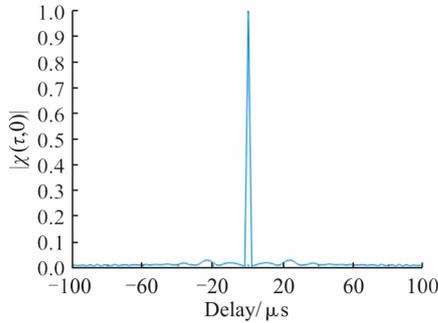
$$S_2(t) = \sum_{k=0}^{N-1} W_N^{\frac{\mu_2 k(k+1)}{2}} e^{j2\pi(f_0 + k\Delta f)t} \cdot \text{Rect}\left(\frac{t}{T_p}\right),$$

$$S_3(t) = \sum_{k=0}^{N-1} W_N^{\frac{\mu_3 k(k+1)}{2}} e^{j2\pi(f_0 + k\Delta f)t} \cdot \text{Rect}\left(\frac{t}{T_p}\right),$$

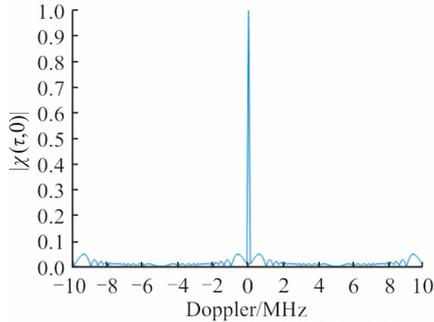
$$S_4(t) = \sum_{k=0}^{N-1} W_{\frac{N}{2}}^{\frac{\mu_4 k(k+1)}{2}} e^{j2\pi(f_0+k\Delta f)t} \text{Rect}\left(\frac{t}{T_p}\right)。$$



(a) ZC-OFDM信号的模糊函数



(b) ZC-OFDM信号的距离分辨率



(c) ZC-OFDM信号的速度分辨率

图 3 ZC-OFDM 信号

接收站 R 接收处理流程如图 4 所示。

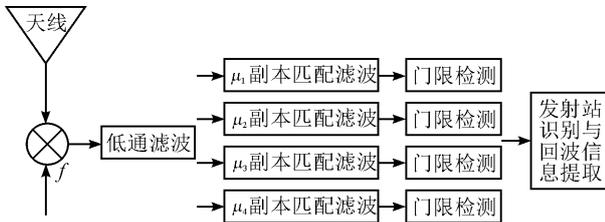


图 4 接收机接收处理结构

信号被接收天线接收以后,经过混频成为零中频信号,零中频信号分成 4 路信号与根值分别为 $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ 的 ZC-OFDM 信号的副本信号进行匹配滤波处理,根据不同根值的 ZC-OFDM 信号之间的分集特性,匹配结果通过门限检测实现对目标的探测和对不同发射站发射信号的识别。

根据奈奎斯特采样定理^[17],发射波形调制码的有效采样长度为:

$$N = BT_p \quad (18)$$

根据 1.2 节性质可知,2 个不同根值的 ZC-OFDM 信号采样序列当其根值的差的绝对值与发射波形调制码有效采样长度 N 互质时,其分集特性

值 ξ_{μ_1, μ_2} 取最大为 \sqrt{N} 。不妨设 N 有最小非 1 因子 λ , 易得如下结论:① $\lambda \leq N$; ② 当且仅当 N 为质数时有 $\lambda = N$, ③ 当 N 为偶数时 $\lambda = 2$ 。则任意小于 N 的正整数 M 可表示为: $M = k\lambda + \omega, (k = 0, 1, \dots, N/\lambda, \omega = 0, 1, \dots, \lambda - 1)$, 现可得如下性质:① 在值小于 N 的正整数中,存在最多有 λ 个正整数组成的数组满足任意两两差的绝对值与 N 互质;② 共有 $(N/\lambda)^\lambda$ 个满足这样条件的正整数组成的数组。

1) 性质①证明:

不妨设有数组 $m = (m_1, m_2, \dots, m_\lambda)$ 满足:

$$m_1 = k_1\lambda + \omega_1, m_2 = k_2\lambda + \omega_2, m_3 = k_3\lambda + \omega_3, \dots, m_\lambda = k_\lambda\lambda + \omega_\lambda, (\omega_1 \neq \omega_2 \neq \dots, \neq \omega_\lambda) \quad (19)$$

则可得数组 m 中任意 2 个数 m_i, m_j 的差的绝对值 $\alpha_{i,j}$ 可表示为^[18]:

$$\alpha_{i,j} = |m_i - m_j| = |(k_i - k_j)\lambda + (\omega_i - \omega_j)| \quad (20)$$

可得 $\text{gcd}(\alpha_{i,j}, N) = 1$ 。

现若在数组 m 中加入一个的正整数 $m_{\lambda+1} = k_{\lambda+1}\lambda + \omega_{\lambda+1}, m_{\lambda+1} \neq m_1 \neq m_2 \neq \dots, \neq m_\lambda$, 则必有 $\omega_{\lambda+1} \in (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_\lambda)$ 。不妨设 $\omega_{\lambda+1} = \omega_\lambda$ 则有:

$$\alpha_{\lambda, \lambda+1} = |m_\lambda - m_{\lambda+1}| = |(k_\lambda - k_{\lambda+1})\lambda + (\omega_\lambda - \omega_{\lambda+1})| = |(k_\lambda - k_{\lambda+1})\lambda| \quad (21)$$

可得 $\text{gcd}(\alpha_{\lambda, \lambda+1}, N) = \lambda \neq 1$ 。性质①得到证明。

2) 性质②证明:

由式(19)可得数组 $m = (m_1, m_2, \dots, m_\lambda)$ 中的任意值可表示为 $m_i = k_i + \omega_i$, 其中 k_i 可以为 $0, 1, \dots, N/\lambda$ 中的任意值, 因此根据组合原理^[19], 总共有 $(N/\lambda)^\lambda$ 种不同的 m 数组组合。

根据上述性质可知,在四发的情况下,为使各发射站的分集特性值均取得最大值,要求发射波形调制码的有效采样长度 N 的最大非 1 因子大于 4。设置带宽 B 、时宽 T_p 为 $B = 49 \text{ MHz}, T_p = 25 \mu\text{s}$, 则 $N = 1225$ 其最大非一因子为 5, 则 $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ 可取 $\mu_1 = 1, \mu_2 = 2, \mu_3 = 3, \mu_4 = 4$ 。在此情况下,可得 T_1, T_2, T_3, T_4 发射站的发射信号波形, T_1 站:

$$S_1(t) = \sum_{k=0}^{1225-1} W_{1225}^{\frac{1k(k+1)}{2}} e^{j2\pi(f_0+k\Delta f)t} \cdot \text{Rect}\left(\frac{t}{T_p}\right),$$

$$S_2(t) = \sum_{k=0}^{1225-1} W_{1225}^{\frac{2k(k+1)}{2}} e^{j2\pi(f_0+k\Delta f)t} \cdot \text{Rect}\left(\frac{t}{T_p}\right),$$

$$S_3(t) = \sum_{k=0}^{1225-1} W_{1225}^{\frac{3k(k+1)}{2}} e^{j2\pi(f_0+k\Delta f)t} \cdot \text{Rect}\left(\frac{t}{T_p}\right),$$

$$S_4(t) = \sum_{k=0}^{1225-1} W_{1225}^{\frac{4k(k+1)}{2}} e^{j2\pi(f_0+k\Delta f)t} \cdot \text{Rect}\left(\frac{t}{T_p}\right)。$$

则接收站在 Δt 波门内,可能出现同时接收 1 个信号或 2 个信号或 3 个信号或 4 个信号 4 种情况,接收信号可表示为:

$$R(t) = \sigma_1 S_1^r(t) + \sigma_2 S_2^r(t) + \sigma_3 S_3^r(t) + \sigma_4 S_4^r(t) + n(t) \quad (22)$$

式中: $S_1^r(t), S_2^r(t), S_3^r(t), S_4^r(t)$ 分别为 4 个发射站

发射信号经目标反射后的散射回波信号; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 分别为散射回波能量损耗系数,当波门内没有 T_i 发射站的发射信号时 $\sigma_i=0$; $n(t)$ 为高斯白噪声。由于此处是研究信号波形的分集特性,因此不妨设在此情况下接收站只存在有回波信号和无回波信号 2 种情况,即 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 取值为 0(该波门内无此发射站发射信号的回波信号)或 1(该波门内有此发射站发射信号的回波信号),这样波形的分集特性将得到最大的验证。图 5~图 8 分别仿真了在有 1 个、2 个、3 个、4 个发射站工作的 4 种工作状态下,接收站 4 个检测通道的检测情况。

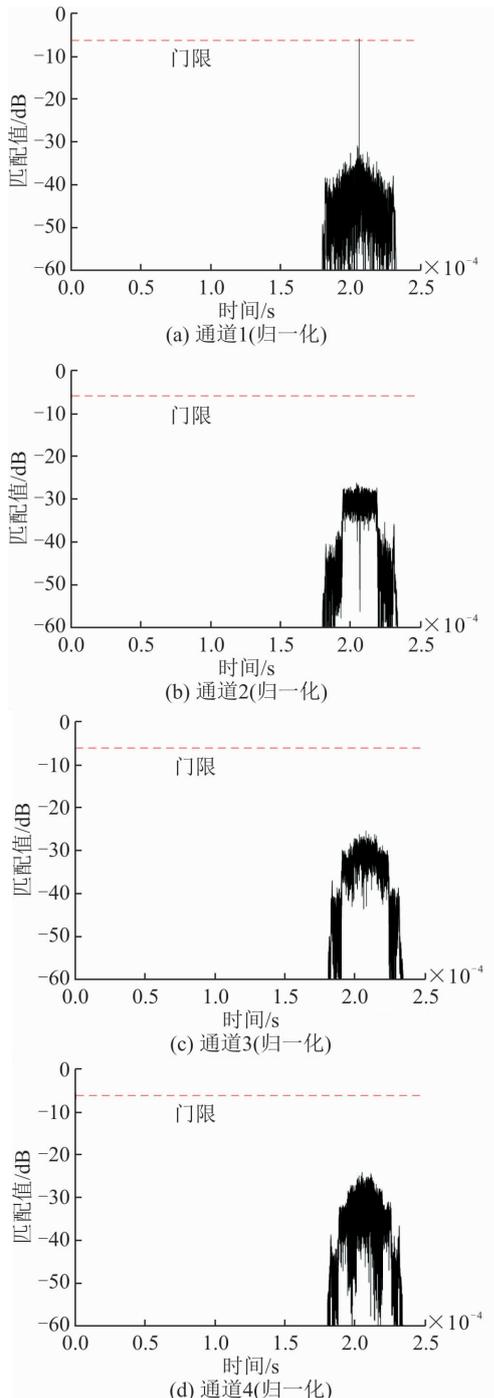


图 5 波门内有 T_1 发射站所发射信号的回波信号

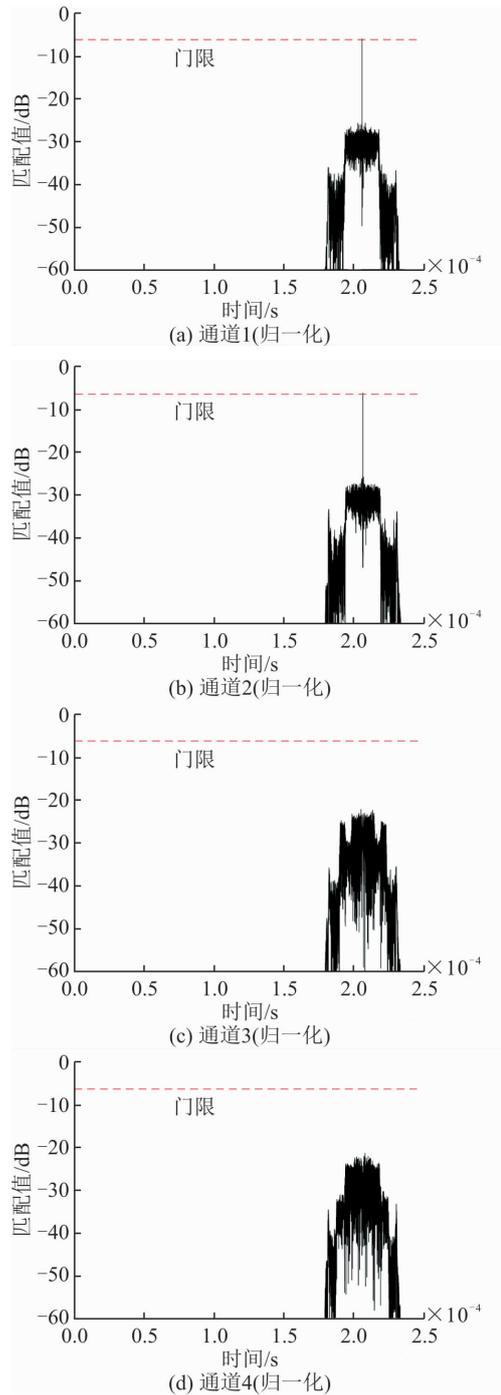
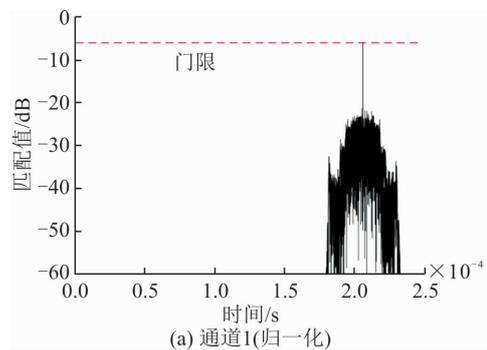


图 6 波门内有 T_1, T_2 发射站所发射信号的回波信号



(a) 通道1(归一化)

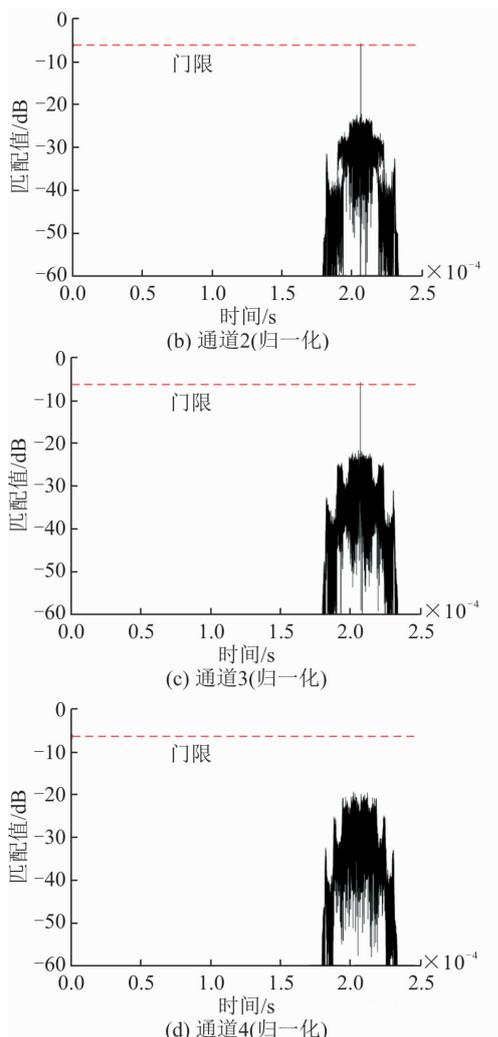


图 7 波门内有 T_1, T_2, T_3 , 发射站所发射信号的回波信号

通过上述仿真结果可以看出,在某一时刻,接收站所接收的 T_1, T_2, T_3, T_4 4 个发射站所发射的不同根值调制的 ZC-OFDM 信号的回波信号在时域交织的情况下,通过接收机 4 个通道的匹配可以将 4 个发射站所发射信号的回波信号进行有效地分离。这表示 ZC-OFDM 信号作为分布式网络化电子信息系统的探测信号能够使系统的波形信号具有良好的分集特性。

在这里需要指出的是,不同根值的 ZC-OFDM 信号属于同一类 ZC-OFDM 信号,它们在频域上是交织的,不是在频域上正交的信号,ZC-OFDM 信号的分集特性不是频域正交信号的分集特性;同时,通过上述对 4 种情况下 4 个通道的信号处理过程的仿真可知,4 个不同根值的 ZC-OFDM 信号经过各自的通道匹配都有较高的脉冲压缩主副瓣比。因此,ZC-OFDM 信号是一种既具有良好探测特性同时还具有良好的分集特性的非正交信号,能够满足分布式系统对探测信号的性能要求。

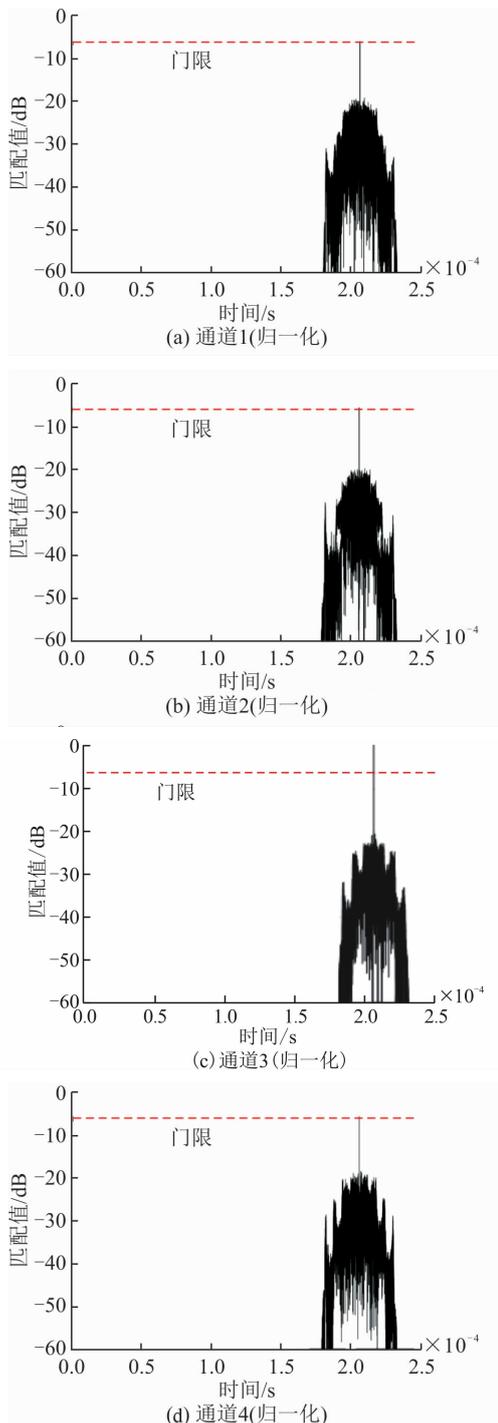


图 8 波门内同时有 T_1, T_2, T_3, T_4 , 发射站所发射信号的回波信号

3 结语

本文对 ZC-OFDM 信号的分集特性进行了研究。通过分析得出了 ZC-OFDM 信号的采样序列与 ZC 序列之间的同构性,进而通过研究 ZC 序列分集特性的方法研究了 ZC-OFDM 信号的分集特性。在此基础上,文章结合分布式网络化电子信息系统的工作特性,提出了在用 ZC-OFDM 信号作为探测信号时,根据布站数来计算 ZC-OFDM 信号调制码有

效采样长度的算法。最后,文章对结合实际参数设计的 ZC-OFDM 信号的信号处理进行了仿真。仿真结果表明,同一长度但不同根值的 ZC 序列调制的 OFDM 信号具有良好的分集特性,能够使得分布式网络化电子信息系统在对回波进行接收处理时对各个发射站所发射信号的回波信号进行有效的分离。

参考文献(References):

- [1] WANG J, DU X, HE Z, et al. A Novel Data-Aided Joint Timing and Carrier Frequency Offset Estimation Based on Central Symmetry ZC Sequence in OFDM/OQAM Systems[J]. *Wireless Personal Communications*, 2016, 90(4):1619-1634.
- [2] WANG D, SHI W, LIU Y, et al. Research on the DFT of ZC Sequence in TD-LTE System[J]. *Wireless Personal Communications an International Journal*, 2016, 88(3):645-655.
- [3] CHU D. Polyphase Codes with Good Periodic Correlation Properties (Corresp)[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 18(4):531-532.
- [4] GUL M M U, LEE S, MA X. Robust Synchronization for OFDM Employing ZC Sequence[C]// *Information Sciences and Systems*. Princeton, NJ: IEEE, 2012:1-6.
- [5] 任斌. CAZAC 序列在 LTE 中的应用研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2009.
REN B. Application Research of CAZAC Sequence in LTE[D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009. (in Chinese)
- [6] TENG C F, LIAO C C, CHENG H Y, et al. Reliable Compressive Sensing (CS)-Based Multi-User Detection with Power-Based ZC Sequence Design[C]// *IEEE International Workshop on Signal Processing Systems*. Lorient, France: IEEE, 2017:1-5.
- [7] JACOB N M, MATHEWS L, PILLAI S S. Transmit Precoding with Encoding Using ZC Sequence for MI-MO-OFDM System[C]// *International Conference on Communication Systems and Networks*. Thiruvananthapuram, India: IEEE, 2017:76-80.
- [8] 刘月平, 姜秋喜, 毕大平, 等. 网络雷达中快起伏 Rician 目标检测性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(7):1671-1677.
LIU Y D, JIANG Q X, BI D P, et al. The Detection Performance Analysis of Network Radar on Rician Targets of Pulse-to-Pulse Fluctuation[J]. *Journal of Electronics and Information*, 2011, 33(7):1671-1677. (in Chinese)
- [9] 刘月平, 姜秋喜, 孙志勇. 视频积累网络雷达对球形目标检测性能分析[J]. *现代雷达*, 2012, 34(2):81-89.
LIU Y P, JIANG Q X, SUN Z Y, et al. Research on the Detection Performance of Non-Coherent Integration Network Radar to Spherical Targets[J]. *Modern Radar*, 2012, 34(2):81-89. (in Chinese)
- [10] POPOVIC B M. Generalized Chirp-Like Polyphase Sequences with Optimum Correlation Properties [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1992, 38(4):1406-1409.
- [11] BEYME S, LEUNG C. Efficient Computation of DFT of ZC Sequences[J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(9):461-463.
- [12] POPOVIC B M. Efficient DFT of ZC Sequences[J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(7):502-503.
- [13] JIANG Q. Network Radar Countermeasure Systems [C]// *Integrating Radar and Radar Countermeasures*. [S. l.]:Springer, 2016:243-272.
- [14] 韩国玺, 何俊, 祁建清, 等. 基于概率的网络雷达对抗系统综合探测定位性能分析[J]. *海军工程大学学报*, 2013, 25(1):96-101.
HAN G X, HE J, QI J Q, et al. Comprehensive Geolocation Performance Analysis of NRCS Based on Probability Theory[J]. *Journal of Naval Engineering University*, 2013, 25(1):96-101. (in Chinese)
- [15] 刘方正, 祁建清. 网络雷达对抗系统有源模式的目标探测搜索[J]. *数据采集与处理*, 2013, 28(4):491-496.
LIU F Z, QI J Q. Target Detection of Active Mode of Network Radar Counter-Measure System[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2013, 28(4):491-496. (in Chinese)
- [16] 张卫, 唐希源, 顾红, 等. OFDM 雷达信号模糊函数分析[J]. *南京理工大学学报*, 2011, 35(4):513-518.
ZHANG W, TANG X Y, GU H, et al. Ambiguity Function Analysis of OFDM Radar Signals[J]. *Journal of Nanjing University of Science & Technology*, 2011, 35(4):513-518. (in Chinese)
- [17] 刘松强. 数字信号处理系统及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 1996.
LIU S Q. Digital Signal Processing System and Application[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 1996. (in Chinese)
- [18] ROSEN K H. Elementary Number Theory and Its Applications[M]. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1988.
- [19] 徐利治. 计算组合数学[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1983.
XU L Z. Computational Combination[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1983. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)