

基于四阶相关的时分多址调制数据独特码盲识别

江桦 宋凯飞 邹坤衡 孙鹏* 巩克现 张玲 王玮

(郑州大学电气与信息工程学院 郑州 450001)

摘要: 针对非合作通信中时分多址(TDMA)信号的独特码(UW)盲识别问题, 该文首次提出分布式独特码的盲识别算法。区别于比特层的独特码识别算法, 该文分别针对集中式独特码和分布式独特码, 提出面向调制数据不同窗口之间相关性的波形层独特码识别算法。算法利用独特码的一致性与相关性, 分两步进行, 首先通过差分累积消除不同突发信号间频偏与相偏的影响, 来纵向对齐各个突发信号的独特码, 然后通过多层差分共轭4阶相关算法识别出独特码的位置和长度。仿真分析了不同突发个数、信噪比和有无频偏相偏情况下算法的性能, 验证了波形层识别独特码的有效性, 针对集中式独特码和分布式独特码, 所提算法在信噪比为5 dB时均达到了95%以上的识别率, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 调制数据; 时分多址信号; 差分累积; 4阶相关; 独特码盲识别

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)YU-0001-09

DOI: [10.11999/JEIT230935](https://doi.org/10.11999/JEIT230935)

Unique Words Blind Identification of Time Division Multiple Access Modulated Data Based on Fourth Order Correlation

JIANG Hua SONG Kaifei ZOU Kunheng SUN Peng GONG Kexian
ZHANG Ling WANG Wei

(School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Considering the problem of blind identification of Unique Words (UW) for Time Division Multiple Access (TDMA) signals in non-cooperative communication, a blind identification algorithm for distributed UW is proposed in this paper. Different from the unique codes recognition algorithm at the bit layer, a unique words recognition algorithm at the waveform layer oriented to the correlation is proposed between different windows of the modulated data for centralised unique words and distributed unique words, respectively. The algorithm takes advantage of the consistency and correlation of the unique words and proceeds in two steps: firstly, the unique words of different burst signals are vertically aligned by eliminating the effects of frequency and phase bias between the different burst signals through differential accumulation, and then the positions and lengths of the unique words are identified by the multilayer differential conjugate fourth order correlation algorithm. The performance of the algorithm is simulated and analysed with different number of bursts, signal-to-noise ratios, and with or without frequency and phase biases, and the effectiveness of the waveform layer identification of unique words is verified, and the algorithm achieves more than 95% of the identification rate at a signal-to-noise ratio of 5dB for both centralized and distributed unique words, which is of certain value for engineering applications.

Key words: Modulated data; Time Division Multiple Access (TDMA) signal; Differential accumulation; Fourth order correlation; Unique Words (UW) blind identification

收稿日期: 2023-08-29; 改回日期: 2023-12-01; 网络出版: 2023-12-07

*通信作者: 孙鹏 iepengsun@zzu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2019QY0302), 国家自然科学基金(61901417)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (2019QY0302), The National Natural Science Foundation of China (61901417)

1 引言

在数字通信系统中,数据以帧为单位进行传输,并通过适当的数字信号处理技术在接收端进行恢复^[1]。在接收端,首先需要对数据进行帧同步,帧同步是从接收数据中区分帧起止时间的过程^[2,3]。对于合作通信,利用已知的独特码,可以准确的完成帧同步。但对于非合作通信来说,通信参数的识别是获取敌对方通信信息和进行电子对抗的前提,要实现接收数据的有效分帧并最终完成数据的解析,首先需要解决独特码的识别问题^[4]。因此,研究一种有效的独特码(Unique Words, UW)盲识别算法具有重要的意义。

时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)方式在战场通信中得到广泛应用,通过将时间划分成互不重叠的时隙实现多个用户共享通信资源,具有通信容量大、频率利用率高等优点。TDMA信号具有特殊的帧结构,通常由载波和比特定时恢复码、独特码、站址识别码、指令信号、勤务信号和消息数据组成,其中独特码是一种不容易为随机比特所效仿而造成错误检测的码组,以此作为突发的时间基准与帧同步依据。TDMA信号的独特码根据插入方式的不同,分为集中式独特码和分布式独特码^[5]。分布式独特码对频移具有显著的鲁棒性,并且在频率偏移校正工作中可以实现高精度的频率估计,因此近些年一些卫星单载波突发通信中使用了分布式独特码。本文针对集中式独特码和分布式独特码的盲识别进行了深入研究。

目前,国内外关于独特码识别的文献越来越多^[6-18],相关研究可以分为等帧长独特码识别和不等帧长独特码识别。等帧长独特码的识别相对简单,已有的算法包括基于独特码周期性的识别算法^[11]、基于软判决的识别算法^[12]、基于码元密度的识别算法^[13]、基于相关滤波和模糊匹配的识别算法^[14]。不等帧长独特码的识别相对困难,目前已有的算法主要针对具有特殊性质的独特码或者特定序列进行研究,已有的算法包括基于离散度分析的识别算法^[15]、基于多重分形谱的识别算法^[16]、基于高阶统计处理技术的识别算法^[17]。但是对于只知道存在独特码而没有任何其他先验信息的不等帧长信号,已有的研究非常之少,其中文献^[18]提出了一种基于循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)的深度学习辅助识别算法,但是该算法具有较高的复杂度,实现较困难。上述独特码识别算法,只能识别集中式独特码,而且还需要信号满足特定的条件或者算法本身拥有极高的复杂度。常见的TDMA信号为独特码具有伪随机性的不等帧长信号,其独特

码具有集中式和分布式两种形式,现有的独特码识别算法很难适用。因此,研究一种有效的TDMA信号独特码盲识别算法具有重要的意义。

现有的独特码识别算法都是在比特层进行的,利用独特码比特数据之间的相似性进行独特码的盲识别,其识别正确率受信号误码率的影响,因为随着误码率的提高,独特码之间的相似性会逐渐降低。对于非合作通信,接收端接收到的TDMA信号最初为调制数据,当接收信号信噪比较低时,对其进行解调会产生较高的误码率,这给比特层独特码识别带来了巨大的困难。若能在调制数据上完成独特码的识别,可以避免解调环节造成的影响,较大程度上保留独特码之间的相似性。此外,识别出独特码的调制数据不仅可以直接利用该数据进行帧同步,还能够根据独特码的2元性^[19],直接按照2进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制对其进行解调,而不用考虑信号整体调制方式,当信号整体为正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制或者更高阶调制,独特码直接按照BPSK调制进行解调可以有效降低独特码的误码率。综合上述原因,本文面向调制数据进行独特码的识别,利用独特码的一致性和相关性,首先纵向对齐独特码,然后通过多层差分共轭4阶相关算法识别出独特码的位置和长度。本算法不需要接收信号满足特定的要求,在能够识别集中式独特码的同时,首次解决了分布式独特码的识别问题,具有普遍适用性。由于利用了相关原理,算法拥有良好的抗噪性能,能够实现较低信噪比下独特码的精确识别。

2 TDMA信号模型

TDMA技术通过将时间划分成互不重叠的时隙,把时隙分配给不同的用户来发送信息,实现多个用户共享通信资源。TDMA信号通常采用多进制相移键控(Multiple Phase Shift Keying, MPSK)调制方式,其突发信号下变频后模型为

$$B_k(i) = A_k e^{j(\omega_k i T + \theta_k)} \cdot e^{j\varphi_k(i)} + n_k(i) \quad (1)$$

其中, k 为接收到的突发信号的编号, $e^{j\varphi_k(i)}$ 是第 i 个码元, $\varphi_k(i)$ 的取值为 $q \cdot 2\pi/M$, ($q = 0, 1, \dots, M-1$), A_k 是第 k 个突发信号的码元波形幅度, T 是码元持续时间, ω_k 是第 k 个突发信号的频偏, θ_k 是第 k 个突发信号的相偏, $n_k(i)$ 为复高斯白噪声。

TDMA信号的独特码分为集中式独特码和分布式独特码,其中集中式独特码TDMA信号的独特码通常连续集中在数据突发的开始部分,独特码的长度一般在十几个符号到几十个符号不等,集中式独特码TDMA信号帧结构如图1所示。

分布式独特码TDMA信号的独特码则采用等间隔插入的方式，每 H 个信息码符号插入 N 个独特码符号，共插入 P 个模块的独特码，总长度为 $N \times P$ 个独特码符号，分布式独特码TDMA信号帧结构如图2所示。

3 独特码盲识别

3.1 识别流程

TDMA信号波形层独特码识别整体流程图如图3所示，对于接收到的TDMA信号，第1步要进行突发检测^[20]，从噪声中把各个突发信号提取出来，第2步完成独特码位置及长度的识别，由于识别出的独特码是调制数据，所以最后一步需要对其进行解调。本文重点研究第2步的独特码识别，基于第1步突发检测提供的不同突发信号的粗起始位置，首先利用差分累积完成各个突发独特码的纵向对齐，然后再利用4阶相关算法消除频偏与相偏的影响准确识别出独特码的起止位置与长度，完成独特码的识别。

3.2 独特码对齐

假设接收到的信号为 $\mathbf{r} = [r(1), r(2), \dots, r(L)]$ ， L 为接收到数据的长度，其中包含 n 个突发信号。时域通过使用突发检测算法检测到接收信号中 n 个突发信号的起始位置，分别为 s_1, s_2, \dots, s_n ，但是由于噪声的影响，此时找到的突发信号起始位置可能会存在误差，这给独特码的对齐造成了困难。考虑到同种信号不同突发的独特码是相同的，基于独特码之间的相关特性，利用差分共轭相乘的方法，每次对齐2个突发信号的独特码，直到对齐所有突发信号的独特码。

从 n 个突发信号的起始位置中任意取出2个，分别设为 s_a 与 s_b ， $a, b \in [1, n]$ 。从2个起始位置开始各向后取 L_0 个数据组成突发信号 \mathbf{B}_a 和 \mathbf{B}_b ，其中 L_0 为最短突发信号的长度



图1 集中式独特码TDMA信号帧结构

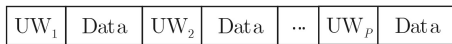


图2 分布式独特码TDMA信号帧结构

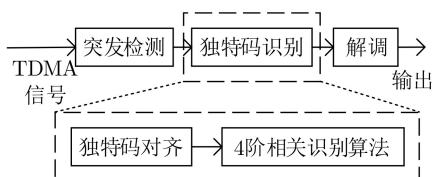


图3 TDMA信号波形层独特码识别整体流程图

$$\mathbf{B}_a = [r(s_a), r(s_a + 1), \dots, r(s_a + L_0 - 1)] \quad (2)$$

$$\mathbf{B}_b = [r(s_b), r(s_b + 1), \dots, r(s_b + L_0 - 1)] \quad (3)$$

针对集中式独特码TDMA信号，当两个突发信号的真正起始位置未对齐时，其独特码也会未对齐，其结构图如图4所示，此时通过滑动窗求得的两者相关值会很小。当两个突发信号的真正起始位置对齐时，其独特码也会对齐，其结构图如图5所示，此时通过滑动窗求得的两者相关值会比较大。

为了对齐突发信号 \mathbf{B}_a 和 \mathbf{B}_b 的独特码，令 \mathbf{B}_a 的突发起始位置不变，左右移动 \mathbf{B}_b 的突发起始位置。当移动正确的长度使两个突发的真正起始位置对齐时，其独特码也会完全对齐，通过滑动窗来求不同位置的相关值，当滑动窗滑动到独特码附近位置时，相关值会达到最大。

突发信号 \mathbf{B}_a 的起始位置不变，其信号表达式为

$$B_a(i) = A_a e^{j(\omega_a i T + \theta_a)} e^{j\varphi_a(i)} + n_a(i), i = 1, 2, \dots, L_0 \quad (4)$$

设突发信号 \mathbf{B}_b 的初始位置移动 m 个数据，再向后取 L_0 个数据得到新的突发信号 \mathbf{B}_b^m ，故由式(3)可得 \mathbf{B}_b^m 和接收信号 \mathbf{r} 的关系式为

$$\mathbf{B}_b^m = [r(s_b + m), r(s_b + 1 + m), \dots, r(s_b + L_0 - 1 + m)] \quad (5)$$

其信号表达式为

$$B_b^m(i) = A_b e^{j(\omega_b i T + \theta_b)} e^{j\varphi_b(i)} + n_b(i), i = 1, 2, \dots, L_0 \quad (6)$$

突发信号 \mathbf{B}_a 和 \mathbf{B}_b^m 分别差分共轭相乘可得

$$y_a(i) = B_a(i+1) \cdot B_a^*(i), i = 1, 2, \dots, L_0 - 1 \quad (7)$$

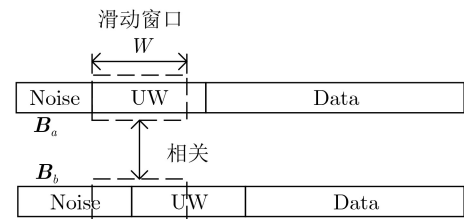


图4 集中式独特码未对齐的TDMA信号结构图

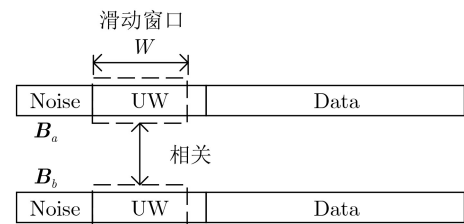


图5 集中式独特码对齐的TDMA信号结构图

$$y_b^m(i) = B_b^m(i+1) \cdot B_b^{m*}(i), i = 1, 2, \dots, L_0 - 1 \quad (8)$$

式(7)和式(8)进行滑动相关求最大值, 代入信号表达式, 忽略噪声的影响可得

$$\begin{aligned} R_{ab}(m) &= \arg \max_i \left| \sum_{k=0}^{W-1} y_a(i+k) \cdot y_b^{m*}(i+k) \right| \\ &= A_a^2 A_b^2 \arg \max_i \left| \sum_{k=0}^{W-1} e^{j(\omega_a - \omega_b)T} e^{j\Delta\varphi_{ab}(i,k)} \right| \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $\Delta\varphi_{ab}(i, k) = [\varphi_a(i+k+1) - \varphi_a(i+k)] - [\varphi_b(i+k+1) - \varphi_b(i+k)]$, i 为滑动窗起始位置, $i \in [1, L_0 - W - 1]$, W 为滑动窗口的长度, 假设其小于独特码实际长度。

利用式(9)求各个 m 下的 $R_{ab}(m)$ 值, 可以看出, 当突发信号 B_a 和 B_b^m 的独特码对齐时, 当滑动窗口滑动到独特码的位置, $\varphi_a(i+k+1) - \varphi_a(i+k)$ 等于 $\varphi_b(i+k+1) - \varphi_b(i+k)$, 此时 $R_{ab}(m)$ 取得最大值, 对应的 m 即为突发信号 B_a 和 B_b 之间的延迟, 而如果2个突发信号的独特码没有对齐, 各矢量会相互抵消, 实际相关结果会很小。因为采用了差分共轭相乘的方式, 相偏 θ_a 和 θ_b 被抵消, 频偏转变为了固定值 $\omega_a - \omega_b$, 经过取模操作后, 不会对相关结果造成影响, 因此该对齐算法具有克服频偏与相偏的能力。对于集中式独特码TDMA信号, 利用该方法对齐所有突发信号的独特码。

针对分布式独特码TDMA信号, 当2个突发信号的真正起始位置未对齐时, 其分布式独特码同样未对齐, 其结构图如图6所示, 此时通过离散滑动窗求得的两者相关值会很小。当两个突发信号的真正起始位置对齐时, 其独特码也会对齐, 其结构图如图7所示, 此时通过离散滑动窗求得的两者相关值会比较大。图6和图7中的Sig表示各个离散滑动窗里的信号, 可能含有噪声、分布式独特码、数据的一种或者多种。

对于分布式独特码突发信号 B_a 和 B_b , 由于其独特码是离散分布的, 并且分布格式未知, 所以在求两个突发信号之间关于独特码的相关值时, 需要做出改变。如图7所示, 独特码和滑动窗都是分布式的。但由于独特码分布格式是未知的, 即 N 和 H 未知, 因此需要遍历滑动窗的格式参数 N' 和 H' , 求出在各种滑动窗格式下两个突发之间的相关值。

假设在求突发信号 B_a 和 B_b^m 在滑动窗为 N' 个独特码符号和 H' 个信号码符号的分布格式下滑动窗内最大相关值时, 滑动窗设置为分布式, 长度设置为 $P'N'$ 个符号, 其中 P' 为滑动窗使用模块的个数, 本文一般设置为10个。在不同滑动窗起始位置

i 处, 需要对分布式滑动窗内的数据进行组合, 组合成行数为 $L_0 - P'(N' + H')$, 列数为 $P'N'$ 的矩阵 $B_{a,N',H'}$ 和 $B_{b,N',H'}^m$ 。

$$B_{a,N',H'}(i, jN' + k) = B_a(i + j(N' + H') + k - 1), \quad j = 0, 1, \dots, P' - 1, k = 1, 2, \dots, N' \quad (10)$$

$$B_{b,N',H'}^m(i, jN' + k) = B_b^m(i + j(N' + H') + k - 1), \quad j = 0, 1, \dots, P' - 1, k = 1, 2, \dots, N' \quad (11)$$

其中, $i \in [1, L_0 - P'(N' + H')]$ 。对 $B_{a,N',H'}$ 和 $B_{b,N',H'}^m$ 分别进行差分共轭相乘, 得到新的序列 $y_{a,N',H'}$ 和 $y_{b,N',H'}^m$, 表达式为

$$y_{a,N',H'}(i, p) = B_{a,N',H'}(i, p+1) \cdot B_{a,N',H'}^*(i, p), \quad p = 1, 2, \dots, P'N' - 1 \quad (12)$$

$$y_{b,N',H'}^m(i, p) = B_{b,N',H'}^m(i, p+1) \cdot B_{b,N',H'}^{m*}(i, p), \quad p = 1, 2, \dots, P'N' - 1 \quad (13)$$

求突发信号 B_a 和 B_b^m 在各种分布格式下的滑动窗口内的最大相关值, 如式(14)

$$\begin{aligned} R_{ab}(m) &= \arg \max_{N', H'} R_{ab}(m, N', H') \\ &= \arg \max_{N', H', i} \left| \sum_{j=0}^{P'-1} \sum_{k=1}^{N'-1} y_{a,N',H'}(i, jN' + k) \cdot y_{b,N',H'}^{m*}(i, jN' + k) \right| \end{aligned} \quad (14)$$

假设已知分布格式中 N' 和 H' 的大致范围, 即 $N' \in [N_1, N_2], H' \in [H_1, H_2]$, i 为滑动窗起始位置, $i \in [1, L_0 - P'(N' + H') - 1]$ 。与集中式独特码类似,

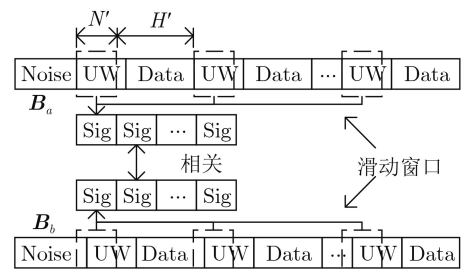


图6 分布式独特码未对齐的信号结构图

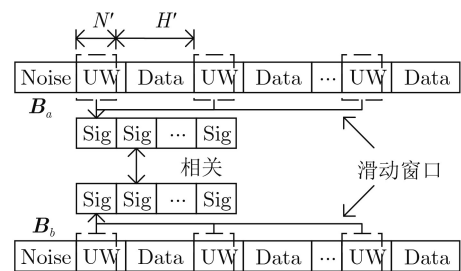


图7 分布式独特码对齐的信号结构图

对于分布式独特码，当两个突发信号的独特码对齐并且滑动窗分布格式正确的情况下，当滑动窗滑动到独特码位置上时，相关值达到最大，对应的 m 为突发信号 \mathbf{B}_a 和 \mathbf{B}_b 之间的延迟。对于分布式独特码TDMA信号，利用该方法对齐所有突发信号的独特码。

3.3 4阶相关识别算法

假设校正过起始位置的 n 个突发信号分别为 $\overline{\mathbf{B}}_1, \overline{\mathbf{B}}_2, \dots, \overline{\mathbf{B}}_n$ ，令 n 个突发信号依次逐行排列为 n 行，此时所有突发信号的独特码纵向对齐，所以可以利用纵向累加滑动窗内独特码之间的相关性来确定独特码的起止位置和长度。但是由于不同突发信号可能是由不同用户发送，即每个突发有不同的幅值、频偏和相偏，传统的相关算法难以适用，针对这个问题，本文提出了4阶相关识别算法，该算法能够消除各个突发信号频偏与相偏的影响。

对于突发信号 $\overline{\mathbf{B}}_a$ ， $a \in [1, n]$ ，其信号表达式为

$$\overline{\mathbf{B}}_a(i) = A_a e^{j(\omega_a i T + \theta_a)} e^{j\varphi_a(i)} + n_a(i), i = 1, 2, \dots, L_0 \quad (15)$$

对其进行4阶差分共轭相乘，得到 \mathbf{Y}_a

$$\begin{aligned} Y_a(i) &= \overline{\mathbf{B}}_a(i) \cdot \overline{\mathbf{B}}_a^*(i-1) \cdot [\overline{\mathbf{B}}_a(i+1) \cdot \overline{\mathbf{B}}_a^*(i)]^* \\ &= A_a^4 e^{j[2\varphi_a(i) - \varphi_a(i-1) - \varphi_a(i+1)]}, \\ & \quad i = 2, 3, \dots, L_0 - 1 \end{aligned} \quad (16)$$

由式(16)可以看出，4阶差分共轭相乘可以消除信号的频偏与相偏，而保留其调制信息，可以很好地解决各个突发频偏和相偏不同的问题。

由于各个突发信号的符号序列间相互统计独立，利用各个突发信号进行多层差分共轭4阶相关，可以准确地确定独特码位置，相关计算为

$$\begin{aligned} \text{Corr}(i) &= \left| \sum_{h=1}^{n-1} \sum_{d=h}^{n-1} \sum_{k=0}^{w_0-1} Y_{d+1}(i+k) \cdot Y_{d+1-h}^*(i+k) \right| \\ &= \left| \sum_{h=1}^{n-1} \sum_{d=h}^{n-1} \sum_{k=0}^{w_0-1} A_{d+1}^4 A_{d+1-h}^4 e^{j\Delta\varphi_{d+1, d+1-h}(i, k)} \right|, \\ & \quad i = 2, 3, \dots, L_0 - w_0 - 1 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{d+1, d+1-h}(i, k) &= [2\varphi_{d+1}(i+k) - \varphi_{d+1}(i+k-1) \\ & \quad - \varphi_{d+1}(i+k+1)] \\ & \quad - [2\varphi_{d+1-h}(i+k) - \varphi_{d+1-h}(i+k-1) \\ & \quad - \varphi_{d+1-h}(i+k+1)] \end{aligned} \quad (18)$$

其中， i 为滑动窗起始位置， n 为参与独特码识别的突发个数，一般选取15~20个突发信号， w_0 为滑动窗口的长度，为了精确地找到独特码的起止范围，这里需要选用小滑动窗，窗长一般设置为2~

4个符号。由式(17)和式(18)可以看出，4阶相关可以消除各个突发信号的频偏与相偏，在独特码所处位置， $2\varphi_{d+1}(i+k) - \varphi_{d+1}(i+k-1) - \varphi_{d+1}(i+k+1)$ 等于 $2\varphi_{d+1-h}(i+k) - \varphi_{d+1-h}(i+k-1) - \varphi_{d+1-h}(i+k+1)$ ，则 $e^{j\Delta\varphi_{d+1, d+1-h}(i, k)}$ 为1，此时纵向累加相关值较大，相关结果较明显。如果不处在独特码的位置，由于数据信息具有随机性，各单位矢量 $e^{j\Delta\varphi_{d+1, d+1-h}(i, k)}$ 相互抵消，实际相关结果会很小。为方便门限划定，对相关结果需要进行归一化。当归一化4阶相关结果大于划定的门限，则认为该位置是独特码的一部分，最终完成独特码的识别。

4 算法步骤

集中式独特码TDMA信号的独特码盲识别算法步骤如**算法1**所示，分布式独特码TDMA信号的独特码盲识别算法步骤如**算法2**所示。

5 仿真实验

实验选取某海事卫星协议中的集中式独特码TDMA信号和分布式独特码TDMA信号各两种，采用4倍过采样，即1个符号取4个采样点，其突发信号格式如**表1**所示。

实验1 6 dB信噪比下独特码识别。

分别仿真产生包含20个突发信号的上述4种TDMA信号，设置调制方式为QPSK，各个突发的归一化频偏在 $[-0.5, 0.5]$ 内随机选取，相偏在

算法1 集中式独特码盲识别算法

输入：接收信号 \mathbf{r} ， n 个突发的粗起始位置 s_1, s_2, \dots, s_n ，对齐所用数据长度 L_0 ，判决阈值 th

输出：独特码起止位置

(1) $\mathbf{B}_1 = r(s_1, s_1 + 1, \dots, s_1 + L_0 - 1)$

(2) **for** $k = 2, 3, \dots, n$ **do**

(3) **for** $m = -c, -c + 1, \dots, c - 1, c$ **do** (其中 $[-c, c]$ 假设为延迟范围)

(4) $\mathbf{B}_k^m = r(s_k + m, s_k + m + 1, \dots, s_k + m + L_0 - 1)$;

(5) 利用式(9)计算 $R_{1k}(m)$;

(6) **end for**

(7) $R_{1k}(m)$ 的最大值对应的 m 为 \mathbf{B}_1 与 \mathbf{B}_k 之间的延迟;

(8) **end for**

(9) 令已对齐独特码的 n 个突发信号纵向排列;

(10) **for** $i = 2, 3, \dots, L_0 - w_0 - 1$ **do**

(11) 利用式(17)计算 $\text{Corr}(i)$ ，并进行能量归一化;

(12) **if** $\text{Corr}(i) > \text{th}$ **then**

(13) 认为 i 所处位置为独特码的一部分;

(14) **end if**

(15) **end for**

(16) 判断出集中式独特码位置;

$[-\pi, \pi]$ 随机选取, 信道环境为加性高斯白噪声, 信噪比为6 dB, 对上述4种TDMA信号进行独特码对齐并计算归一化4阶相关值, 集中式独特码TDMA

信号结果如图8所示, 分布式独特码TDMA信号结果如图9所示。

算法2 分布式独特码盲识别算法

输入: 接收信号 r , n 个突发的粗起始位置 s_1, s_2, \dots, s_n , 对齐所用数据长度 L_0 , 判决阈值 th

输出: 独特码起止位置及分布格式

- (1) $B_1 = r(s_1, s_1 + 1, \dots, s_1 + L_0 - 1)$
- (2) for $k = 2, 3, \dots, n$ do
- (3) for $m = -c, -c + 1, \dots, c - 1, c$ do
- (4) $B_k^m = r(s_k + m, s_k + m + 1, \dots, s_k + m + L_0 - 1)$;
- (5) for $N' = N_1, N_1 + 1, \dots, N_2$ do
- (6) for $H' = H_1, H_1 + 1, \dots, H_2$ do
- (7) 利用式(14)计算 $R_{1k}(m, N', H')$;
- (8) end for
- (9) end for
- (10) end for
- (11) $R_{1k}(m, N', H')$ 的最大值对应的 m 为 B_1 与 B_k 的延迟;
- (12) end for
- (13) 令已对齐独特码的 n 个突发信号纵向排列;
- (14) for $i = 2, 3, \dots, L_0 - w_0 - 1$ do
- (15) 利用式(17)计算 $Corr(i)$, 并进行能量归一化;
- (16) if $Corr(i) > th$ then
- (17) 认为 i 所处位置为独特码的一部分;
- (18) end if
- (19) end for
- (20) 判断出分布式独特码位置以及分布格式;

由图8可知, 集中式独特码TDMA信号1和集中式独特码TDMA信号2的归一化4阶相关值在一段较长连续采样点位置上具有较高值, 这些采样点即为独特码的一部分, 符合其独特码是集中式的特性。由图9可知, 分布式独特码TDMA信号1和分布式独特码TDMA信号2的归一化4阶相关值在周期性的多段较短连续采样点位置上具有较高值, 这些采样点即为独特码的一部分, 每段长度大致相同, 符合其独特码是分布式的特性。划定阈值为0.3, 超过阈值即认为该采样点是独特码的一部分, 独特码识别结果如表2所示。由表2可知, 各个TDMA信号的独特码识别结果与其实际独特码格式大致相同。为了后续实验独特码识别成功具有明确的标准, 这里规定集中式独特码识别成功标准为寻找到独特码起始位置和长度, 而分布式独特码识别成功标准为寻找到独特码起始位置和分布格式。

实验2 突发个数对独特码识别率的影响。

设置信道环境为加性高斯白噪声, 分别仿真产生信噪比为2 dB, 4 dB和6 dB的集中式独特码TDMA信号1以及信噪比为2 dB, 4 dB和6 dB分布式独特码TDMA信号2, 设置调制方式为QPSK, 各个突发的归一化频偏在 $[-0.5, 0.5]$ 内随机选取, 相偏在 $[-\pi, \pi]$ 随机选取, 在不同突发个数条件下各进行200次的蒙特卡洛仿真实验, 检验本文算法在不同突发个数条件下正确识别独特码的概率, 结果如图10所示。

表1 突发信号格式统计

TDMA信号	突发信号格式
集中式独特码TDMA信号1	128独特码采样点+不定长度数据
集中式独特码TDMA信号2	256独特码采样点+不定长度数据
分布式独特码TDMA信号1	16独特码采样点+104数据采样点+...+16独特码采样点+104数据采样点
分布式独特码TDMA信号2	32独特码采样点+208数据采样点+...+32独特码采样点+208数据采样点

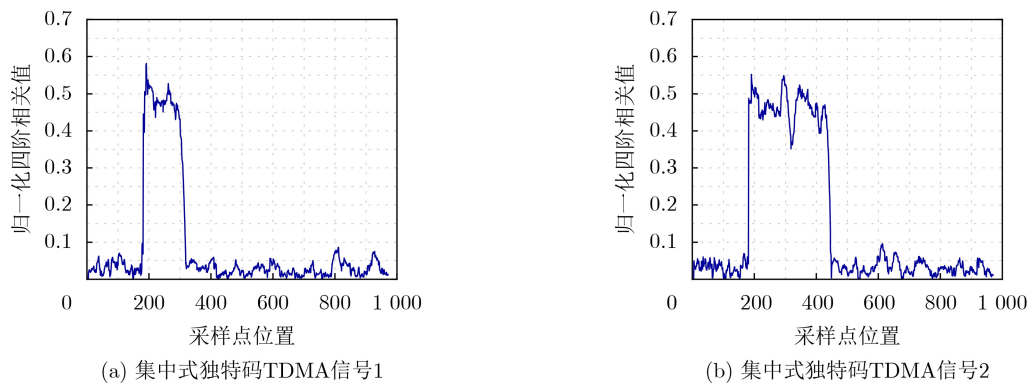


图8 6 dB信噪比下集中式独特码TDMA信号归一化4阶相关值

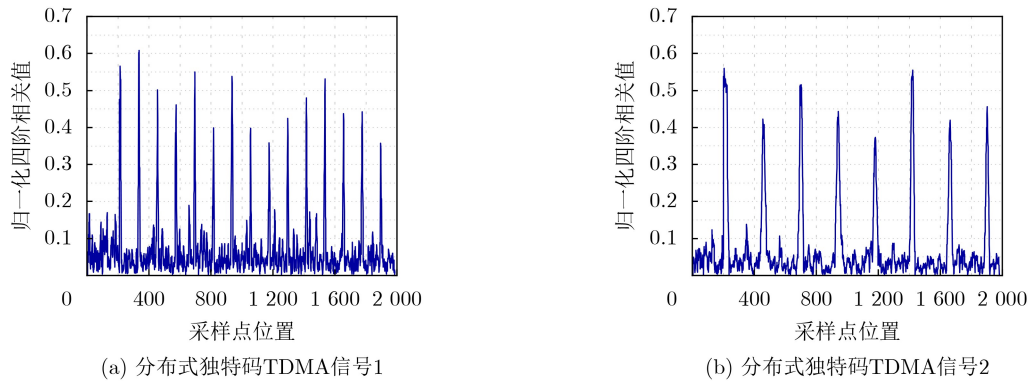


图 9 6 dB信噪比下分布式独特码TDMA信号归一化4阶相关值

表 2 6 dB信噪比下独特码识别结果统计

TDMA信号	识别结果
集中式独特码TDMA信号1	独特码长度为127个采样点
集中式独特码TDMA信号2	独特码长度为259个采样点
分布式独特码TDMA信号1	每个模块为16个独特码采样点+104个数据采样点
分布式独特码TDMA信号2	每个模块为31个独特码采样点+209个数据采样点

由图10可以看出，随着参与独特码识别的突发个数的增加，独特码识别率随之提高，当参与独特码识别的突发个数达到18个后，各种信噪比下信号的独特码识别率达到最大值。

实验3 信噪比、频偏与相偏对独特码识别率的影响。

分别仿真产生包含20个突发信号的集中式独特码TDMA信号1和分布式独特码TDMA信号2，设置调制方式为QPSK。为了仿真信噪比以及频偏与相偏对算法独特码识别率的影响，设计了4组实验，第1组实验选用集中式独特码TDMA信号1，各个突发的归一化频偏在 $[-0.5, 0.5]$ 内随机选取，相偏在 $[-\pi, \pi]$ 随机选取；第2组实验选用集中式独特码TDMA信号1，各个突发均不加频偏与相偏；第3组实验选用分布式独特码TDMA信号2，各个突发的归一化频偏在 $[-0.5, 0.5]$ 内随机选取，相偏在 $[-\pi, \pi]$ 随机选取；第4组实验选用分布式独特码TDMA信号2，各个突发均不加频偏与相偏。信道环境为加性高斯白噪声，在不同信噪比条件下各进行200次的蒙特卡洛仿真实验，检验本文算法在不同信噪比、有无频偏与相偏条件下正确识别出独特码的概率，结果如图11所示。

由图11可知，对于集中式独特码TDMA信号和分布式独特码TDMA信号，本文算法在有无频偏与相偏情况下的仿真曲线几乎重合，定量地验证了算法克服频偏和相偏性能的理论分析，表明对于实际TDMA信号中各个突发频偏与相偏不相同的情况，本文算法具有良好的独特码识别性能。由

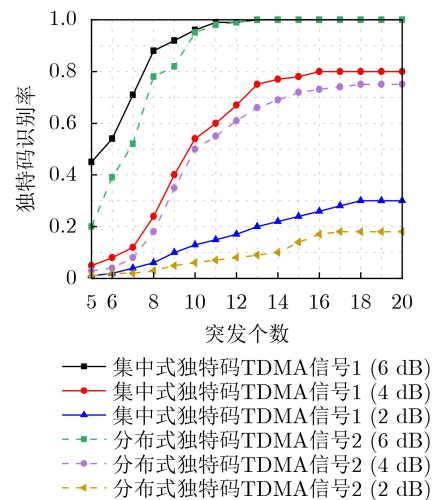


图 10 不同突发个数下独特码识别率

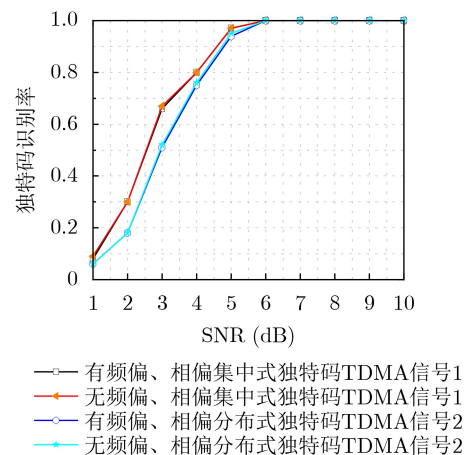


图 11 不同信噪比、有无频偏与相偏下独特码识别率

图11还可以看出,随着信噪比的提高,TDMA信号独特码的识别率逐渐提高,当信噪比达到6 dB时,TDMA信号独特码的识别率达到100%。对于集中式独特码TDMA信号和分布式独特码TDMA信号,本文算法均能实现较低信噪比下独特码精确识别。

实验4 集中式独特码盲识别算法性能对比。

目前已有的研究都聚焦于集中式独特码方面,针对分布式独特码的研究几乎没有。这里比较在不同信噪比下,本文算法、多重分形谱算法^[16]以及基于RNN的深度学习算法^[18]对于集中式独特码的识别正确率。由于多重分形谱算法需要大量数据,所以仿真产生包含100个突发的集中式独特码TDMA信号1,而本文算法和基于RNN的深度学习算法只使用其中的20个突发。设置信号调制方式为QPSK,各个突发的归一化频偏在 $[-0.5, 0.5]$ 内随机选取,相偏在 $[-\pi, \pi]$ 随机选取,信道环境为加性高斯白噪声。由于多重分形谱算法和基于RNN的深度学习算法是在比特层进行的,对信号先进行解调硬判决成比特数据后再进行独特码的识别。分别利用上述3种算法在不同的信噪比下各进行200次的蒙特卡洛独特码识别仿真实验,识别结果如图12所示。

由图12可知,对于具备伪随机性的独特码,基于有偏性的多重分形谱算法不具备识别能力。当信噪比在2 dB时,深度学习算法不具备识别能力,而本文算法保持在30%左右;当信噪比升高到4 dB,此时深度学习算法的识别概率在50%左右,而本文算法能够达到80%;信噪比继续升高到5 dB时,深度学习算法的识别概率为70%左右,而本文算法的识别概率已经达到97%。由结果可以看出,在信噪比较低时,本文算法的独特码识别概率明显高于基于RNN的深度学习算法。

6 结论

本文针对未知结构下集中式独特码TDMA信号和分布式独特码TDMA信号的独特码盲识别问

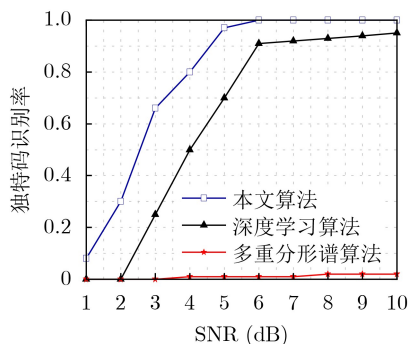


图12 不同信噪比下各算法独特码识别率对比

题,基于独特码之间的一致性与相关性,提出一种面向调制数据的波形层独特码盲识别算法。算法首先通过差分累积来纵向对齐独特码,然后通过4阶相关算法识别独特码位置及长度。本算法相较于以往的独特码盲识别算法,首次解决了分布式独特码的识别问题,并且对信号本身没有任何特定要求,具有普遍适用性。仿真验证了本文算法的有效性,表明算法具有较好的抗噪声性能和一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] 张永光,楼才义.信道编码及其识别分析[M].4版.北京:电子工业出版社,2010:1-2.
ZHANG Yongguang and LOU Caiyi. Channel Coding and Recognition Analysis[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 1-2.
- [2] AL-AZZEH J, FAURE E, SHCHERBA A, et al. Permutation-based frame synchronization method for data transmission systems with short packets[J]. *Egyptian Informatics Journal*, 2022, 23(3): 529-545. doi: 10.1016/j.eij.2022.05.005.
- [3] SON W, CHOI J, PARK S, et al. A time synchronization protocol for barrage relay networks[J]. *Sensors*, 2023, 23(5): 2447. doi: 10.3390/s23052447.
- [4] LI Xinhao, MA Tao, and QIAN Qishu. Frame synchronization method based on association rules for CNAV-2 messages[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2023, 32(2): 295-302. doi: 10.23919/cje.2021.00.148.
- [5] 侯骁宇,李天昀,杨司韩.分布式独特码TDMA信号的检测和频率估计[J].信号处理,2018,34(10):1211-1220. doi: 10.16798/j.issn.1003-0530.2018.10.009.
HOU Xiaoyu, LI Tianyun, and YANG Sihan. Detection and frequency estimation of distributed unique word TDMA signal[J]. *Journal of Signal Processing*, 2018, 34(10): 1211-1220. doi: 10.16798/j.issn.1003-0530.2018.10.009.
- [6] 刘明.一种改进的分段式互相关帧同步检测方法[J].通信技术,2023,56(6):708-713. doi: 10.3969/j.issn.1002-0802.2023.06.006.
LIU Ming. A modified segmental cross-correlation algorithm for frame synchronization detection[J]. *Communications Technology*, 2023, 56(6): 708-713. doi: 10.3969/j.issn.1002-0802.2023.06.006.
- [7] ZHANG Shengyuan, SUN Houteng, YUAN Jiangnan, et al. A practical method for blind detection of centralized unique word TDMA signal[C]. 2022 4th International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering, Shenzhen, China, 2022: 7-10. doi: 10.1109/CISCE55963.2022.9851161.
- [8] QASEM Z A H, WANG Junfeng, KUAI Xiaoyan, et al.

- Enabling unique word OFDM for underwater acoustic communication[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(9): 1886–1889. doi: [10.1109/LWC.2021.3085020](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3085020).
- [9] D'AMICO A A and MORELLI M. Joint frame detection and channel parameter estimation for OOK free-space optical communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(7): 4731–4744. doi: [10.1109/TCOMM.2022.3177768](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3177768).
- [10] XU Yiyao, ZHONG Yang, and HUANG Zhiping. An improved blind recognition algorithm of frame parameters based on self-correlation[J]. *Information*, 2019, 10(2): 64. doi: [10.3390/info10020064](https://doi.org/10.3390/info10020064).
- [11] KIL Y S, LEE H, KIM S H, *et al.* Analysis of blind frame recognition and synchronization based on sync word periodicity[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 147516–147532. doi: [10.1109/ACCESS.2020.3014426](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014426).
- [12] QIN Jiangyi, HUANG Zhiping, LIU Chunwu, *et al.* Novel blind recognition algorithm of frame synchronization words based on soft-decision in digital communication systems[J]. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0132114. doi: [10.1371/journal.pone.0132114](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132114).
- [13] 熊颢, 雷迎科, 吴子龙. 基于码元密度检测的帧同步码盲识别算法[J]. *探测与控制学报*, 2021, 43(1): 73–78.
- XIONG Hao, LEI Yingke, and WU Zilong. Frame synchronization code blind recognition based on symbol density detection[J]. *Journal of Detection & Control*, 2021, 43(1): 73–78.
- [14] 张玉, 杨晓静. 集中插入式帧同步识别方法[J]. *兵工学报*, 2013, 34(5): 554–560. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2013.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2013.05.007).
- ZHANG Yu and YANG Xiaojing. Recognition method of concentratively inserted frame synchronization[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(5): 554–560. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2013.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2013.05.007).
- [15] 邵堃, 雷迎科. 基于离散度分析的帧同步快速盲识别算法[J]. *信号处理*, 2020, 36(3): 361–372. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2020.03.006](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2020.03.006).
- SHAO Kun and LEI Yingke. Fast blind recognition algorithm of frame synchronization based on dispersion analysis[J]. *Journal of Signal Processing*, 2020, 36(3): 361–372. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2020.03.006](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2020.03.006).
- [16] 李歆昊, 张旻, 韩树楠. 基于多重分形谱的链路层协议帧同步字盲识别[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(7): 1666–1672. doi: [10.11999/JEIT161045](https://doi.org/10.11999/JEIT161045).
- LI Xinhao, ZHANG Min, and HAN Shunan. Frame synchronization word identification of link layer protocol based on multi-fractal spectrum[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(7): 1666–1672. doi: [10.11999/JEIT161045](https://doi.org/10.11999/JEIT161045).
- [17] 白彧, 杨晓静, 张玉. 基于高阶统计处理技术的m-序列帧同步码识别[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(1): 33–37. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.00500](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.00500).
- BAI Yu, YANG Xiaojing, and ZHANG Yu. A recognition method of m-sequence synchronization codes using higher-order statistical processing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(1): 33–37. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.00500](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.00500).
- [18] KIL Y S, SONG J M, KIM S H, *et al.* Deep learning aided blind synchronization word estimation[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 30321–30334. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3058351](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3058351).
- [19] 熊静华, 杨战平. 独特码及其编码原理研究[J]. *信息与电子工程*, 2003, 1(2): 26–30. doi: [10.3969/j.issn.1672-2892.2003.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2892.2003.02.006).
- XIONG Jinghua and YANG Zhanping. Study on unique signal and its coding principle[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2003, 1(2): 26–30. doi: [10.3969/j.issn.1672-2892.2003.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2892.2003.02.006).
- [20] 何玉红. 基于双滑动窗的TDMA信号盲检测算法实现[J]. *通信技术*, 2012, 45(6): 70–72. doi: [10.3969/j.issn.1002-0802.2012.06.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0802.2012.06.021).
- HE Yuhong. Implementation of TDMA signal blind detection algorithm based on double sliding windows[J]. *Communications Technology*, 2012, 45(6): 70–72. doi: [10.3969/j.issn.1002-0802.2012.06.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0802.2012.06.021).
- 江桦: 男, 教授, 硕士生导师, 博士生导师, 研究方向为通信信号处理、信号检测和电子对抗.
- 宋凯飞: 男, 硕士生, 研究方向为通信信号分析与处理.
- 邹坤衡: 男, 博士生, 研究方向为卫星信号处理、无线电测向.
- 孙鹏: 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为消息传递与因子图理论、卫星通信与电子对抗.
- 巩克现: 男, 教授, 硕士生导师, 博士生导师, 研究方向为通信信号分析、信道编码和目标态势感知.
- 张玲: 女, 副教授, 研究方向为网络安全.
- 王玮: 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为通信信号处理.

责任编辑：余蓉