



基于公约式权重的截短线性分组码盲识别方法

沈利华¹, 章剑林²

(1. 浙江工业大学之江学院, 浙江 绍兴 312030;
2. 杭州师范大学阿里巴巴商学院, 浙江 杭州 311121)

摘要: 针对通信信号侦察处理中的截短线性分组码的盲识别问题, 提出了一种基于公约式权重最大化的识别方法。算法对侦收的码字序列进行不同长度的分段, 计算分段码字与 x^n+1 的最大公约式并按公约式阶数进行滤除, 通过高阶公约式的个数估计码字长度。同时根据公约式的出现概率定义公约式的权重, 利用权重最大的公约式实现码字生成多项式的估计。仿真实验表明算法有效可行, 并理论分析了算法的容错性和计算复杂度。和已有算法相比较, 本文算法在相同的误码率条件下, 具有更高的检测识别概率, 且同时具备截短码字和非截短码字的识别能力。

关键词: 盲识别; 线性分组码; 欧几里得算法; 公约式; 权重

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017194

Blind recognition of short linear block code based on the weight of common polynomial

SHEN Lihua¹, ZHANG Jianlin²

1. Zhijiang College of Zhejiang University of Technology, Shaoxing 312030, China
2. Alibaba Business School of Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China

Abstract: According to the problem of a short linear block code in communication signal processing, an algorithm based on the maximal weight of common polynomial was proposed. Firstly, the received code sequence was divided with different lengths. Then the common polynomial of code words and x^n+1 was obtained and filtered. The code length was estimated by the number of common polynomials. The weight was defined according to the probability of polynomial, and the generator polynomial was recovered according to the maximal weight. The validity and the performances of the blind recognition method were illustrated by the computer simulation results. The correct recognition rate of the algorithm is higher than that of the existing algorithms under the same bit error rate, and the method is applicable for both short codes and normal codes.

Key words: blind recognition, linear block code, Euclidean algorithm, common polynomial, weight

1 引言

纠错编码技术可对通信数据在传输过程中产

生的差错进行控制, 实现数据的快速稳定传输, 已广泛应用于现代数字通信领域。在非合作信号处理领域, 纠错编码盲识别技术应运而生, 将非

合作信号处理技术从信号层扩展到了信息层。纠错编码盲识别能够在未知编码参数的情况下根据侦收的码字序列来识别编码类型并估计编码参数,在智能通信、信息截获和信息对抗等领域具有重要作用,已经成为非合作信号处理领域理论与技术研究的前沿问题和研究热点,对该技术进行研究具有重要的理论意义和应用价值^[1]。线性分组码是应用非常广泛的一类纠错码,具有严格的代数结构,被广泛应用于卫星通信、深空通信、移动通信等数字通信系统。目前对于线性分组码盲识别已经取得了较为丰硕的研究成果^[2-16],主要分为基于欧几里得算法^[2,3]、基于有限域傅里叶变换算法^[4-6]、基于信息差熵和码根统计的算法^[7,8]、基于码重分布的算法^[9-12]以及其他一些识别算法^[13-16]。其中,基于有限域傅里叶变换的识别算法和基于信息差熵和码根统计的识别算法效果较好。但在实际通信系统中,由于编码信息序列有时会有固定的长度,此时往往采用截短的线性分组码。例如,DVB-S标准中采用的(204,188)截短RS码^[17],其编码过程是在188位信息序列前补充长度为51的0序列,得到239长度的信息序列,经过(255,239)RS编码,由于RS编码器为系统编码器,编码后前面的51位码字仍全为0,可以将其截去,得到204长度的截短RS码。在接收端,首先对码字前端补充51位全0序列,得到长度255的码字,再对编码进行译码,将译码后的序列截去最前面的51位全0序列,得到原始的188位信息序列。截短分组码的优势在于增加了编码的灵活性,同时通过截短码字也提高了信息的传输效率,但截短分组码也增大了识别的难度。

首先,截短分组码的码长不再具有 $2^m - 1$ 的特性,而是可以为任意的长度,因此通过遍历码长获取码根信息差熵函数^[7]来实现码长估计的方法会因遍历次数增加而导致计算量突增,不适于数据的实时处理。其次,截短后的码字不再具有截短前码字的频域特性^[5],因此基于有限域傅里叶

变换的识别方法并不适用于截短分组码。虽然截短分组码在其频域上的特性已不存在,但截短部分为全0序列,因此其码字多项式仍为一个完整的码字多项式,每个码字多项式仍旧是生成多项式 $g(x)$ 的倍式,利用欧几里得算法^[2]可以迅速估计码字多项式的最大公约式,实现生成多项式 $g(x)$ 的估计。但有限域欧几里得算法的缺点在于不能较好地适应误码。为此,本文利用有限域欧几里得算法对截短码字多项式的最大公约式进行估计,根据公约式的出现概率定义码字公约式的权重,再根据公约式的权重分布,剔除错误码字的影响,利用权重最大的公约式实现码字生成多项式的估计,提高算法的误码适应能力。

2 线性分组码盲识别的数学模型

(n, k) 线性分组码是将信息序列分成固定长度的 k 维信息向量 u ,编码器按照生成多项式将输入的信息向量转化为 n 维向量 v ,用关系式可表示为:

$$u(x) = u_0 + u_1x + u_2x^2 + \cdots + u_{k-1}x^{k-1} \quad (1)$$

$$g(x) = 1 + g_1x + g_2x^2 + \cdots + g_{n-k-1}x^{n-k-1} + x^{n-k} \quad (2)$$

$$v(x) = u(x)g(x) = v_0 + v_1x + v_2x^2 + \cdots + v_{n-1}x^{n-1} \quad (3)$$

其中, x 表示单位时延。线性分组码 $v(x)$ 由生成多项式 $g(x)$ 来完全确定,每一个码字多项式 $v(x)$ 均是 $g(x)$ 的整数倍。同样, $v(x)$ 的生成多项式 $g(x)$ 也是 $x^n + 1$ 的因式,即:

$$x^n + 1 = g(x)h(x) \quad (4)$$

其中,多项式 $h(x)$ 是具有如下形式的 k 次多项式:

$$h(x) = h_0 + h_1x + \cdots + h_kx^k \quad (5)$$

$h(x)$ 为码字的校验多项式。校验多项式与码字之间存在如下校验关系:

$$h(x)v(x) = 0 \pmod{x^n + 1} \quad (6)$$

式(6)表示 $h(x)v(x)$ 能够被 $x^n + 1$ 整除。



对线性分组码的盲识别就是从接收序列中估计码字长度,并将接收序列按码字长度分组,利用码字特性估计码字的生成多项式 $g(x)$ 。

3 基于公约式权重最大化的截短线性分组码盲识别

若 $v'(x)$ 为一个截短线性分组码的码多项式,其码字长度为 n' ,其未截短的码多项式为 $v(x)$,码字长度为 n 。则有:

$$\begin{aligned} v'(x) &= v_0 + v_1x + \cdots + v_{n'-1}x^{n'-1} \\ &= v_0 + v_1x + \cdots + v_{n'-1}x^{n'-1} + 0 \cdot x^{n'} + \cdots + 0 \cdot x^{n-1} \\ &= v(x) \end{aligned} \quad (7)$$

所以 $v'(x)$ 也是生成多项式 $g(x)$ 的倍式,且码字长度之间具有 $n = 2^{\lceil \lg n' \rceil} - 1$ 的约束关系。令 $a(x)$ 和 $b(x)$ 分别为截短码字多项式和 $x^n + 1$,则必能找到一个 $a(x)$ 和 $b(x)$ 的线性组合^[3],使得:

$$u(x)a(x) + v(x)b(x) = d(x) \quad (8)$$

其中, $d(x)$ 是 $a(x)$ 和 $b(x)$ 的最大公约式。通常利用欧几里得算法能够求解 $d(x)$,欧几里得算法是一个递归算法,参考文献[3]中对其进行了详细论述,这里不再赘述。

欧几里得算法同样适用于截短线性分组码,但欧几里得算法的明显缺陷是不能适应误码,本节利用欧几里得算法求解截短码字多项式的最大公约式 $d(x)$,并定义公约式的权重,根据高阶公约式的个数估计码字长度,利用权重最大的公约式估计生成多项式 $g(x)$,且算法具有较好的误码适应能力。

首先是码字长度 n' 的估计,对于线性分组码,其编码一般在帧同步码插入之前,且已有公开文献对帧同步码的识别进行了分析^[18],因此可认为在线性分组码识别之前,数据的帧同步信息已经获取,即数据的帧长度和码字的起始位置已知^[19]。一帧数据内通常包含整数个码字,因此首先将数据帧长度进行因数分解,得到数据帧长度的全部因数,定义为 a_i , $i = 1, 2, \dots, \varpi$ 。利用 a_i 的组合可

得到所有可能码长的一个集合 $b_j, j = 1, 2, \dots, \theta$ 。将接收的线性分组码按不同码长 $n' = b_j$ 进行分组,假设分组个数为 N ,则每组序列都假定为一个码多项式,此时对应的非截短码长为 $n = 2^{\lceil \lg n' \rceil} - 1$,分别计算码多项式和 $x^n + 1$ 的最大公约式。由于线性分组码奇偶校验位的数目小于 mt ,其中 t 为纠错位数, $m = \lg(n+1)$ 。当 $t=1$ 时,生成多项式的次数最低为 m ,因而次数小于 m 的公约式可以滤除,当码长分组正确时,则每组序列都为真正的码多项式,假设此时的误码率为 ε ,则码多项式正确的概率为 $(1-\varepsilon)^{n'}$,则次数大于 m 的最大公约式个数服从一个均值为 $(1-\varepsilon)^{n'}N$ 、方差为 $(1-\varepsilon)^{n'}N/2$ 的正态分布;而当码长分组错误或者分组正确但码多项式中含错时,码多项式和 $x^n + 1$ 一般不存在公约式或为 $1+x, 1+x^2, 1+x+x^2$ 等低阶公约式,通过基于多项式次数的滤除,只有极少数码多项式与 $x^n + 1$ 有高阶的公约式。根据参考文献[4]的论证,可将检测门限 T 设置为 $4\sqrt{N}$,假设求解的次数大于 m 的最大公约式个数为 r ,当 $r > T$ 时表示码长分组正确,当 $r < T$ 时则表示码长分组错误。

当码长得到正确估计后,此时根据码多项式求解的 $d(x)$ 分为以下 3 种情况。

- 正确生成多项式 $g(x)$ 。
- 正确生成多项式的倍式,即 $g(x)f(x)$ 。
- 错误生成多项式 $g'(x)$ 。

其中,以 $g(x)$ 和 $(1+x)g(x)$ 出现的概率最大,而生成多项式的高阶倍式和错误生成多项式出现的概率很小。在高阶的公约式条件下,只有 $g(x)$ 和 $(1+x)g(x)$ 是固定出现,而错误的生成多项式则是随机出现的,因此,根据不同公约式出现的概率,定义相同次数下的公约式权重如下,假设相同次数下公约式个数为 α ,且公约式分为 i 种,每种个数为 β_i ,则每种公约式的权重为 β_i^2/α 。这使得正确的生成多项式 $g(x)$ 和 $(1+x)g(x)$ 所占权重较大,而随机出现的错误生成多项式 $g'(x)$ 权重较

小。通过突出正确公约式的权重占比,使其出现概率得到非线性放大,以便后续的检测分析。

在 $d(x)$ 中计算每种次数下公约式的权重,并在其中找出权重最大的两组公约式,利用欧几里得算法求其最大公约式,即可得到正确的生成多项式。综上所述,基于公约式权重最大化的截短线性分组码盲识别算法可归纳如下。

输入 接收码序列 v 及数据帧长度 l 。

输出 分组码码长 n' 及生成多项式 $g(x)$ 。

步骤1 将 l 进行因数分解,得到其所有的因数 $a_i, i=1, 2, \dots, \varpi$ 。

步骤2 利用 a_i 的组合可得到所有可能码长的一个集合 $b_j, j=1, 2, \dots, \theta$ 。

步骤3 将接收码序列按预估码长 n' 进行分段, $n'=b_j$, 得到一个 $N \times n'$ 的观察矩阵 H , 同时 $n=2^{\lfloor \lg n' \rfloor}-1$, 设置一个计数器 r 为0。

步骤4 将 H 矩阵的每一行序列转化为码多项式, 并利用欧几里得算法求解码多项式和 x^n+1 的最大公约式 $d_i(x)$, 如果 $d_i(x)$ 的次数大于 m , $m=\lg(n+1)$, 则计数器加1, 否则将 $d_i(x)$ 设置为0。

步骤5 判断 r 与门限 T 的大小, 如果 $r < T$, 则遍历下一个码长, 将码序列分组得到新的观察矩阵, 同时计数器清零, 并返回步骤4; 如果 $r > T$, 则此时的分组长度即正确码长, 并转至步骤6。

步骤6 设置一个长度为 n' 的向量 w , 则根据 $d_i(x)$ 的次数将 w 中相应位置加1, 直至将 $d_i(x)$ 按次数划分完毕。

步骤7 计算每种次数下公约式的权重 z 。

步骤8 取出 z 中最大的两组公约式, 并计算它们的最大公约式, 即生成多项式 $g(x)$ 。

4 算法理论性能分析

(1) 算法计算复杂度

在算法的计算量方面, 计算码多项式与 x^n+1 的最大公约式时, 最大递归次数不超过 $(n-m)$ 次,

且在每次递推中进行的多项式乘法次数为1, 每次多项式乘法的计算量为 n 次二元域乘法和加法。因此基于公约式权重最大化方法的二元域乘法和加法的计算量最大约为 $2(n-m)Nn$, 其计算复杂度为 $N \cdot O(n^2)$ 。

(2) 算法误码适应能力

在算法的误码适应能力上, 本算法和有限域傅里叶变换算法^[5]、信息熵和码根统计算法^[7]都是基于在码序列中寻找无误码码字, 并利用无误码字特征的累积量实现码字的识别, 而其利用的数学方法如欧几里得算法、有限域傅里叶变换和有限域多项式求根等本身并不具备误码适应能力。因此接收的码序列中的正确码字必须达到一定的比例, 算法才能对码字进行有效识别。设码序列中的误码率为 ε , 码字个数为 N , 截短码字长度为 n' , 则正确码字的概率为 $(1-\varepsilon)^{n'}$, 假设正确码字的比例为 x , 则实现正确识别必须使得正确码字数超过检测门限, 即 $Nx > 4\sqrt{N}$, 得到 $x > 4/\sqrt{N}$ 。在不同码字数情况下, 正确识别码字所需要的码字正确概率见表1。

表1 在不同码字数情况下, 正确识别码字所需要的码字正确概率

码字数	码字正确概率
500	0.178 9
1 000	0.126 3
10 000	0.040 0
100 000	0.012 6

令 $(1-\varepsilon)^{n'} > x$, 则在不同的码字长度时, 算法的理论误码适应能力为:

$$\varepsilon \leq 1 - \sqrt[n']{x} \quad (9)$$

算法在不同码字数下识别各种码长码字的理论误码适应能力见表2。

5 算法仿真实验

根据生成多项式 $g=[111011011001001110111$



表2 算法在不同码字个数下识别各种码长码字的理论误码适应能力

码长	$N=500$	$N=1\ 000$	$N=10\ 000$	$N=100\ 000$	$N \rightarrow +\infty$
$n=15$	10.84%	12.88%	19.31%	25.29%	35.63%
$n=31$	5.4%	6.46%	9.86%	13.16%	19.2%
$n=63$	2.69%	3.23%	4.98%	6.71%	9.96%
$n=127$	1.35%	1.62%	2.99%	3.39%	5.07%
$n=255$	0.67%	0.81%	1.49%	1.7%	2.56%

0111] (高阶在前), 仿真生成 (60,36) 的截短 BCH 码, 帧长度为 420, 即一帧内含有 7 个码字, 加入误码率 $\varepsilon=0.01$, 所截取的码字个数都为 100。利用本文提出的算法进行检测, 不同分组长度计算得到次数大于 m 的公约式个数见表 3, 此时的检测门限值为 40。当分组长度为 60 时, 其公约式个数为 64, 大于门限值, 而其余分组长度计算的公约式个数则远小于检测门限, 因此正确的码字长度为 60。

表3 不同分组长度计算得到的次数大于 m 的公约式个数

分组长度	公约式个数	分组长度	公约式个数
10	16	35	0
12	23	42	11
14	13	60	64
15	17	70	0
20	21	84	0
21	13	105	8
28	21	140	0
30	23	210	0

当分组长度为 60 时, 各公约式的次数分布如图 1 所示。计算每种次数下公约式的权重, 其中, 权重最大的公约式次数为 25 和 26, 其公约式向量分别为:

$$\begin{aligned} g_1 &= [1110110110010011101110111] \\ g_2 &= [100110111010110100110011001] \end{aligned} \quad (10)$$

它们之间存在如下关系: $g_2(x) = g_1(x)(1+x)$, 因此它们的最大公约式为 $g_1(x)$, 而 BCH 码的生成多项式正为 $g_1(x)$, 验证了本文算法的有效性。

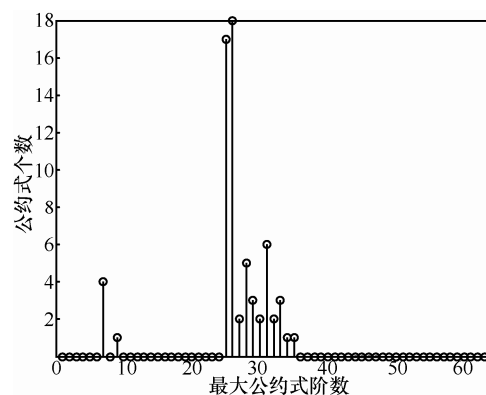


图1 分组长度为 60 时的公约式次数分布

在码字长度分别设为 [31,63,127,255]、误码率设置为 0~10% 的情况下, 对 500 个码字进行 1 000 次蒙特卡洛仿真实验, 各种码长的误码适应性如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 随着码长的增加, 算法的误码适应能力逐渐减弱。在相同误码率条件下, 长度越长的码字中越有可能出现误码, 因此当误码率增大时, 算法正确识别长码的性能最先下降。算法对 255 长度码字可以适应 0.7% 的误码率; 而对 31 长度的码字算法的误码适应能力甚至达到了 7%。仿真实验结果表明, 算法的误码适应能力比理论分析结果还要略好一些, 这主要是因为, 在理论分析时, 并没有考虑到错误码字多项式与 x^n+1 高阶公因式的影响, 因此公因式个数要达到 $4\sqrt{N}$ 的检测门限, 则必然提高了正确码字多项式的概率, 在仿真实验中, 错误码字多项式的高阶公因式同样计算在内, 因此可以降低正确码字多项式的概率, 使得算法的误码适应能力优于其理论分析的结果。

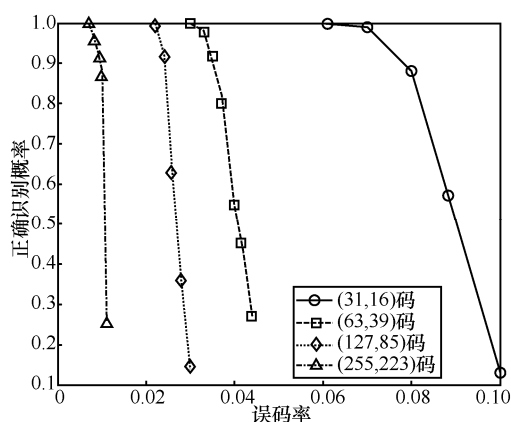


图2 算法在码字数为500时的误码适应性

本文算法同样适用于非截短码字，现将公约式权重最大化算法与码根信息差熵和码根统计算法以及有限域频谱累积量算法的识别方法进行比较，码长分别设置为[15,31,63,127,255]，误码率设置为0~10%，进行1000次蒙特卡罗仿真，以正确识别概率高于95%为算法的误码适应能力，3种算法的误码适应能力如图3所示。

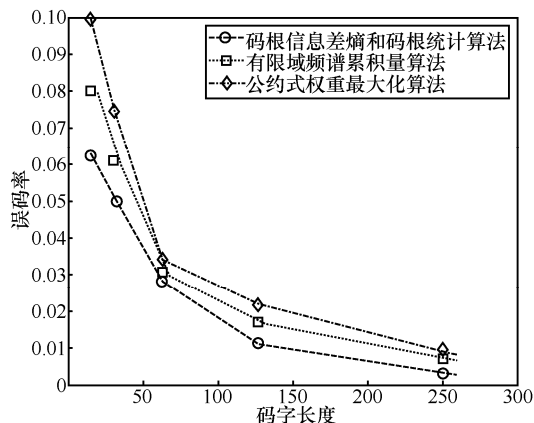


图3 3种算法的误码适应能力

从图3中可以看出，3种算法的误码适应能力较为接近，其中本文算法性能优于其他两种算法，这主要是因为本文算法在相同码字数时所需的码字正确概率低于其他两种算法，因此能够适应误码率更高的一些情况。此外，前两种算法只适应非截短分组码的情况，而本文算法的另一优势是在对分组码长度进行分析判断时，考虑了截短线性分组码的情况，因此本文算法既可以实现对

非截短线性分组码的识别，又能够适应截短线性分组码的情况。

6 结束语

本文针对截短线性分组码的检测识别问题，提出了一种基于公约式权重最大化的识别方法。算法利用有限域欧几里得算法计算码字多项式与 x^n+1 的最大公约式，并根据公约式的次数对公约式进行滤除，从而根据高阶公约式的个数实现码字长度的估计。然后对相同阶数的不同公约式定义其权重，利用所有公约式权重的最大值实现码字生成多项式的估计。仿真结果表明算法可行，和已有算法相比较，本文算法同时具备截短码字和非截短码字的识别能力，且在相同的误码率条件下，具有更高的检测识别概率。

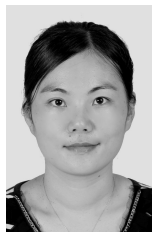
参考文献:

- [1] 解辉, 黄知涛, 王丰华. 信道编码盲识别技术研究进展[J]. 电子学报, 2013, 41(6): 1166-1176.
XIE H, HUANG Z T, WANG F H. Research progress of blind recognition of channel coding[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(6): 1166-1176.
- [2] WANG J F, YUE Y, YAO J. Statistical recognition method of binary BCH code[J]. Communications and Network, 2011, 31(3): 17-22.
- [3] 杨晓静, 闻年成. 基于秩函数和Euclidean算法的循环码盲识别[J]. 电路与系统学报, 2012, 17(5): 120-124.
YANG X J, WEN N C. A blind method of cyclic codes based on rank function and Euclidean arithmetic[J]. Journal of Circuits and Systems, 2012, 17(5): 120-124.
- [4] 王丰华, 解辉, 黄知涛, 等. 基于频谱累积量的线性分组码检测识别方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(12): 2595-2599.
WANG F H, XIE H, HUANG Z T, et al. Blind recognition of linear block code based on spectral cumulants[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(12): 2595-2599.
- [5] 刘健, 谢铭, 周希元. RS码的盲识别方法[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(3): 363-367.
LIU J, XIE N, ZHOU X Y. Blind recognition method of RS coding[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(3): 363-367.
- [6] 朱联祥, 李荔. RS码的盲识别方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(8): 781-787.



- ZHU L X, LI L. Research on blind recognition for RS code[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(8): 781-787.
- [7] 杨晓静, 闻年成. 基于码根信息差熵和码根统计的BCH码识别方法[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(3): 69-73.
- YANG X J, WEN N C. Recognition method of BCH codes based on roots information dispersion entropy and roots statistic [J]. Journal of Detection & Control, 2010, 32(3): 69-73.
- [8] 张永光, 郑仕链. BCH 码的参数识别研究[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2013, 40(5): 72-77.
- ZHANG Y G, ZHENG S L. Research on parameter identification of BCH codes[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2013, 40(5): 72-77.
- [9] 张旻, 李歆昊. 基于关联规则的二进制线性分组码盲识别[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(5): 979-984.
- ZHANG M, LI X H. Blind identifying of binary linear block code based on association rules[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(5): 979-984.
- [10] 李歆昊, 张旻, 陆凯, 等. 基于游程间隔特征的线性分组码码长识别方法[J]. 探测与控制学报, 2014, 36(5): 29-33.
- LI X H, ZHANG M, LU K, et al. Linear block code length blind identification based on run interval feature[J]. Journal of Detection & Control, 2014, 36(5): 29-33.
- [11] 李歆昊, 张旻. 基于码重分布与汉明距离的线性码盲识别方法[J]. 探测与控制学报, 2013, 35(4): 68-73.
- LI X H, ZHANG M. Linear code blind identification method based on code weight distribution and hamming distance[J]. Journal of Detection & Control, 2013, 35(4): 68-73.
- [12] 陈金杰, 杨俊安. 一种对线性分组码编码参数的盲识别方法[J]. 电路与系统学报, 2013, 18(2): 248-254.
- CHEN J J, YANG J A. A method of blind recognition to coding parameters of linear block codes[J]. Journal of Circuits and Systems, 2013, 18(2): 248-254.
- [13] 阔永红, 曾伟涛, 陈健. 基于概率逼近的本原 BCH 码编码参数的盲识别方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(2): 332-339.
- KUO Y H, ZENG W T, CHEN J. Blind identification of primitive BCH codes parameters based on probability approximation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(2): 332-339.
- [14] 张天骐, 易琛, 张刚, 等. 基于高斯列消元法的线性分组码参数盲识别 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(7): 1514-1519.
- ZHANG T Q, YI C, ZHANG G, et al. Blind identification of parameters of linear block codes based on columns Gaussian elimination[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(7): 1514-1519.
- [15] 王平, 曾伟涛, 陈健, 等. 一种利用本原元的快速 RS 码盲识别算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2013, 40(1): 105-110.
- WANG P, ZENG W T, CHEN J, et al. Fast blind recognition algorithm for RS codes by primitive element[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2013, 40(1): 105-110.
- [16] 甘露, 周攀. 基于中国剩余定理分解的 RS 码快速盲识别算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(12): 2837-2842.
- GAN L, ZHOU P. Fast blind recognition method of RS codes based on chinese remainder theorem decomposition[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(12): 2837-2842.
- [17] ETSI. Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services[S]. 1997.
- [18] IMAD R, HOUCHE S. Blind frame synchronization and phase offset estimation for coded systems[C]//IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, July 6-9, 2008, Recife, Brazil. New Jersey: IEEE Press, 2008: 11-15.
- [19] 向建伟, 于秀兰, 景小荣. 毫米波大规模 MIMO 系统中低复杂度混合预编码方法[J]. 电信科学, 2016, 32(9): 10-15.
- XIANG J W, YU X L, JING X R. Low complexity hybrid pre-coding method in mmWave massive MIMO system[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(9): 10-15.

[作者简介]



沈利华 (1978-), 女, 浙江工业大学之江学院副教授, 主要研究方向为电子商务技术、网络安全、算法设计等。



章剑林 (1966-), 杭州师范大学阿里巴巴商学院教授、副院长, 主要研究方向为大数据、电子商务等。