

基于多重分形谱的链路层协议帧同步字盲识别

李歆昊* 张旻 韩树楠

(电子工程学院 合肥 230037)

(安徽省电子制约技术重点实验室 合肥 230037)

摘要: 该文针对协议类型未知条件下非等帧长同步字的盲识别问题,提出一种基于多重分形谱的同步字盲识别算法。首先,在定义有偏性的基础上,通过分析比较协议帧、同步字和信息段中 0, 1 的概率分布,得出协议帧的有偏性小于同步字的结论。然后,利用上述结论并结合多重分形谱具有描述有偏性分布的特点,通过比较删减前后待识别序列多重分形谱宽度的变化实现信息段的有效删减,达到提高同步字浓度的目的。最后,在计算完成删减的序列中固定长度比特串浓度值分布的基础上,实现了同步字的准确识别。仿真试验验证了所提算法的有效性,表明其具有一定的工程应用价值。

关键词: 帧结构; 非等帧长; 同步字识别; 信息段; 有偏性; 多重分形谱

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)07-1666-07

DOI: 10.11999/JEIT161045

Frame Synchronization Word Identification of Link Layer Protocol Based on Multi-fractal Spectrum

LI Xinhao ZHANG Min HAN Shunan

(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

(Key Laboratory of Anhui Electronic Restricting Technique, Hefei 230037, China)

Abstract: To solve the problem of recognition for frame synchronization word whose frame length is not the same, a novel frame synchronization word identification algorithm based on multi-fractal spectrum is proposed. Firstly, through the analysis of frame structure and bias of synchronization words and information bits, the conclusion that bias of protocol frame is less than synchronization words is got. Then, due to the feature of bias distribution that can be described by multi-fractal spectrum, information bits can be deleted effectively through multi-fractal spectrum calculation. Finally, the synchronization word can be identified by concentration calculation of fixed length bit string of deleted sequence. The new method, which has higher accurate recognition than existing algorithms suggested by simulation results, has significant potential in engineering application.

Key words: Frame structure; Unequal frame length; Synchronization word identification; Information bits; Bias; Multi-fractal spectrum

1 引言

随着社会的飞速发展,无线通信和智能通信在人们的生活中扮演着越来越重要的角色,而通信协议分析是上述通信过程中不可或缺的重要组成部分^[1]。在非合作的军事对抗领域,协议分析是获取敌方通信信息和进行有效干扰的前提^[2]。因此,针对通

信协议识别的研究受到了国内外学者的广泛关注。链路层协议是通信协议的重要组成部分,由于其种类繁多且帧结构各不相同,要实现有效分帧并最终完成协议的解析,首先需要解决同步字的识别问题^[3]。因此,研究一种有效的同步字识别算法具有重要的意义。

目前,国内外关于链路层协议帧同步字识别的文献越来越多,相关研究可分为等帧长同步字识别和非等帧长同步字识别^[4-11]。等帧长同步字的识别相对简单,已有的算法主要包括文献[7]提出的累积滤波算法、文献[8]提出的集中插入式算法和文献[9]提出的相关滤波和哈达玛变换算法。对于误码率高的情况,文献[9]利用二次相关滤波、哈达玛变换和

收稿日期: 2016-10-12; 改回日期: 2017-02-08; 网络出版: 2017-03-21

*通信作者: 李歆昊 lixinhao1989616@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61171170), 安徽省自然科学基金(1408085QF115)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61171170), The Natural Science Foundation of Anhui Province (1408085QF115)

模糊匹配完成同步字的识别，具有较好的鲁棒性。非等帧长同步字的识别相对困难，已有算法主要包括文献[10]提出的编码 QS 算法，文中针对已有模式匹配算法不适用于比特流识别的情况，在分析经典 QS 算法的基础上，结合比特流的特点对已有 QS 算法进行了优化，通过对典型链路层协议帧同步字的识别验证了算法的有效性。文献[11]针对 802.3, 802.4 和 802.5 3 种典型链路层协议，提出了一种称为容器算法的同步字识别算法。算法将侦听到的二进制数据流特殊位置的若干比特放入长度一定的缓存块中，并与预先设置好的固定特殊位进行匹配，重复上述过程，直到匹配完所有的特殊位，完成同步字的识别。分析已有非等帧长同步字识别算法，它们都是在协议类型已知的条件下，通过匹配的方式完成识别。然而在非合作的通信对抗领域，已有的同步字识别算法将很难适用。因此，研究一种有效的非等帧长同步字盲识别算法具有重要的意义。

分形概念揭示自然界中一大类无规则形体的内在规律——标度不变性，其中多重分形所描述的主要是某个参量的有偏性分布^[12-15]。由于协议帧中信息段长度远大于同步字导致同步字浓度下降，而同步字的有偏性大于信息段，因此本文提出了一种基于多重分形谱的同步字盲识别算法。算法在分析同步字和信息段有偏性的基础上，得出同步字有偏性大于信息段的结论；利用上述结论，对待识别序列中的信息段进行循环删减，通过比较删减前后待识别序列多重分形谱宽度的变化达到提高同步字浓度的目的；最后，在完成删减的基础上计算待识别序列中固定长度比特串浓度值的分布，实现同步字的准确识别。

2 协议帧

2.1 基础知识

数据链路层的协议虽然有许多种，但为了保证数据传输的准确性和可靠性，各种协议的比特流在链路层都要封装成帧并且进行透明传输。

封装成帧就是在一段数据的前后分别添加头部和尾部，这样就构成了一个完整帧，图 1 表示用帧首部和帧尾部封装成帧的一般概念^[16]。



图 1 帧封装

由于帧的开始和结束的标记是使用专门指明的控制字符，因此，传输数据中任何 8 bit 的组合一定不允许和用作帧定界的控制字符的比特编码一样，否则就会出现帧定界的错误，满足以上编码条件的传输被称为透明传输。

在完成了帧封装且满足透明传输的条件后，各协议帧无缝连接形成比特流进行传输。此时，帧首部与帧尾部拼接在一起形成具有同步功能的字段，我们称之为同步字；两两同步字之间包含的是协议帧的数据部分，我们称之为信息段。因此，对于链路层传输的比特流形式的帧结构，我们可以将它表示成同步字和信息段两部分，其结构如图 2 所示。

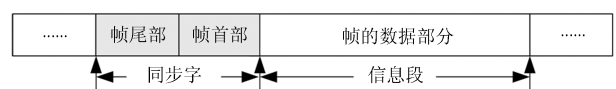


图 2 链路层帧结构

2.2 协议帧的编码

为了提高数据传输的可靠性，链路层协议帧的信息段普遍采用信道编码进行差错控制，一般采用的编码方式有 Turbo 编码、BCH 编码、RS 编码和卷积编码。根据协议类型的不同，部分协议的信息段数据在编码后还会进行伪随机化处理^[17]。如空间数据系统咨询委员会(CCSDS)遥测传输帧(TM)、遥控传输帧(TC)和近空间链路协议(Proximity-1)的协议子层就采用了线性和卷积编码，其中的 TM、TC 协议子层还进行伪随机化处理^[2]。

由于序列经过信道编码后有偏性降低，且伪随机化会进一步降低序列的有偏性^[18]。因此，链路层协议帧数据中，信息段的有偏性要低于同步字。本文利用多重分形具有的有偏性统计特点，实现了协议帧中信息段的删减，在提高同步字浓度的基础上实现了链路层协议帧的同步字识别。

3 协议帧的有偏性分析

定义 1^[18] 若二进制序列中 1 的出现概率为 ν ，则序列的有偏性是 $1/2 - \nu$ ，它反映了序列中 0, 1 比特的分布情况。

假设输出的协议帧数据是 $d = (d_1, d_2, \dots, d_{l_1+l_2})$ ，其中同步字长度是 l_1 ，有偏性是 λ ，信息段长度是 l_2 ，有偏性是 η ，如图 3 所示。

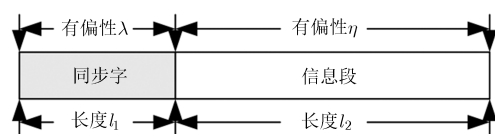


图 3 协议帧信息

由同步字有偏性是 λ 可知, 同步字中 1 的出现概率如式(1)所示^[18]。

$$\Pr(d_i = 1) = \frac{1}{2} - \lambda, \quad i = 1, 2, \dots, l_1 \quad (1)$$

同理, 信息段中 1 的出现概率如式(2)所示。

$$\Pr(d_i = 1) = \frac{1}{2} - \eta, \quad i = 1, 2, \dots, l_2 \quad (2)$$

因此, 协议帧中 1 的出现概率可由式(3)表示。

$$\begin{aligned} \Pr(d_i = 1) &= \frac{(1/2 - \lambda)l_1 + (1/2 - \eta)l_2}{l_1 + l_2} \\ &= \frac{1}{2} - \frac{\lambda l_1 + \eta l_2}{l_1 + l_2}, \quad i = 1, 2, \dots, l_1 + l_2 \quad (3) \end{aligned}$$

由式(3)可知, 协议帧有偏性 $\psi = (\lambda l_1 + \eta l_2)/(l_1 + l_2)$, 化简后如式(4)所示。

$$\psi = \lambda + \frac{\eta - \lambda}{l_1 + l_2} l_2 \quad (4)$$

由于同步字有偏性大于信息段有偏性, 由式(4)可知同步字有偏性大于协议帧, 即 $\lambda > \psi$ 。

4 同步字的识别

4.1 协议帧的多重分形谱

将长度为 L 的协议帧数据 I 按分割长度 φ 划分成 $\lfloor L/\varphi \rfloor$ 段 ($\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整), 把各段转换成相应的十进制数并计算十进制数种类 ϕ (L 足够大时 $\phi = 2^\alpha$), 统计各十进制数的出现概率 P_i 并对其进行分档, 计算每一档下概率 P_i 的数目 N_j 。令 $\varepsilon = 1/\phi$, 则有式(5), 式(6)成立^[19]。

$$P_i(\varepsilon) \propto \varepsilon^\alpha \quad (5)$$

$$N_j(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-f(\alpha)} \quad (6)$$

这里的 α 是奇异指数, 它是反映分形上各十进制数奇异程度的量; $f(\alpha)$ 的物理意义是表示相同 α 值的子集的分形维数, 一般将 $f(\alpha)$ 称为多重分形谱^[19]。

4.2 多重分形谱的有偏性计算

多重分形谱的计算包括解析方法和统计物理方法^[19], 由于后者具有更广的应用范围, 因此本文选用统计物理方法进行多重分形谱的计算。

定义配分函数 $\chi_q(\varepsilon)$, 对各十进制数的出现概率 $P_i(\varepsilon)$ 进行 q 次方加权求和, 其数学表达式为

$$\chi_q(\varepsilon) \equiv \sum P_i(\varepsilon)^q = \varepsilon^{\tau(q)} \quad (7)$$

如果式(7)后面的等式成立, 即配分函数 $\chi_q(\varepsilon)$ 和十进制数种类 ε 有幂函数关系, 则可以从 $\ln \chi_q \sim \ln \varepsilon$ 曲线的斜率得到式(8), 一般把 $\tau(q)$ 称为质量指数^[19]。

$$\tau(q) = \frac{\ln \chi_q(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} \quad (\varepsilon \rightarrow 0) \quad (8)$$

按概率 $P_i(\varepsilon)$ 的大小进行分档后求和, 式(7)可表示成式(9)的形式:

$$\chi_q(\varepsilon) \equiv \sum P_i(\varepsilon)^q = \sum N(P)P^q \quad (9)$$

式中的 $N(P)$ 是概率为某一档 P 的数目。由式(5)和式(6), 式(9)可以表示为

$$\chi_q(\varepsilon) = \sum \varepsilon^{-f(\alpha)} \varepsilon^{\alpha q} = \sum \varepsilon^{\alpha q - f(\alpha)} = \varepsilon^{\tau(q)} \quad (10)$$

最后的等式在系统属于多重分形时成立, 它可以改写为

$$\sum \varepsilon^{\alpha q - f(\alpha) - \tau(q)} = 1 \quad (11)$$

当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时, 求和号中 $\alpha q - f(\alpha) - \tau(q) > 0$ 的项趋于 0, $\alpha q - f(\alpha) - \tau(q) > 0$ 的项不应该出现, 因为此时将出现无限大, 这样一来只有 $\alpha q - f(\alpha) - \tau(q) = 0$ 的项目保留下来, 即

$$\tau(q) = \alpha q - f(\alpha) \quad (12)$$

而 α 可以从以下的微分得出, 即^[19]

$$\alpha = d\tau(q)/dq \quad (13)$$

由式(7), 式(8)和式(13)可得:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{d\tau(q)}{dq} = \frac{d}{dq} \left(\frac{\ln \chi_q(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} \right) = \frac{d}{dq} \left(\frac{\ln \sum P_i(\varepsilon)^q}{\ln \varepsilon} \right) \\ &= \frac{\sum [P_i(\varepsilon)^q \ln P_i(\varepsilon)]}{\ln \varepsilon \sum P_i(\varepsilon)^q} \quad (14) \end{aligned}$$

将式(8)和式(14)代入式(12)得:

$$f(\alpha) = \frac{q \sum [P_i(\varepsilon)^q \ln P_i(\varepsilon)]}{\ln \varepsilon \sum P_i(\varepsilon)^q} - \frac{\ln \sum P_i(\varepsilon)^q}{\ln \varepsilon} \quad (15)$$

由奇异指数 α 和多重分形谱 $f(\alpha)$ 构成的图形就是所求的多重分形谱, 多重分形谱的宽度越宽表示对应序列的有偏性越大^[19]。由于协议帧的有偏性小于同步字, 通过计算删减前后待识别序列多重分形谱宽度的变化, 可以有效提高同步字的浓度并完成识别, 下面给出证明。

4.3 有效性分析

由于链路层协议帧以字节为单位进行传输, 其中同步字长度一般大于等于 3 byte。在无需遍历起始位的情况下, 我们按照设置的分割长度 φ 对待识别序列进行删减, 本文算法可以有效保证删减过程向着提高同步字浓度的方向收敛, 下面对其进行分析。

假设待识别序列一帧中同步字长度为 s_1 , 信息段长度为 s_2 , 在分割长度为 φ 的条件下对序列进行分割, 分割后包含同步字的分割段有 $\lfloor s_1/\varphi \rfloor$ 个, 令 $M = \lfloor s_1/\varphi \rfloor$, 则包含信息段的分割段有 $\lfloor (s_1 - \varphi M + s_2)/\varphi \rfloor$ 个。因此, 删除包含同步字的分割段概率如式(16)所示。

$$\frac{M}{M + \lfloor (s_1 - \varphi M + s_2)/\varphi \rfloor} \quad (16)$$

化简式(16)得到式(17):

$$1 - \frac{1}{1 + M / [(s_1 - \varphi M + s_2) / \varphi]} \quad (17)$$

因为 $M = \lfloor s_1 / \varphi \rfloor$, $s_1 - \varphi M \geq 0$, 当 $s_2 \gg s_1$ 时, 式(17)的取值为0, 即有式(18)成立。

$$\lim_{s_2 \rightarrow \infty} 1 - \frac{1}{1 + M / [(s_1 - \varphi M + s_2) / \varphi]} = 0 \quad (18)$$

因此, 当信息段长度 s_2 远大于同步字长度 s_1 时, 删减过程向着提高同步字浓度的方向收敛。由于实际应用的协议帧中信息段长度远大于同步字长度, 由式(18)可知删减过程具有收敛性。

选取3段长度相同的TC协议帧数据, 对其中两段分别做删去相同长度同步字和信息段处理、一段不做处理。分别选取 2×10^4 bit 上述3种数据, 计算它们的多重分形谱分布, 结果如图4所示。

图4中3种数据的多重分形谱宽度由大到小依次是删减信息段数据、无删减数据和删减同步字数据。当协议帧数据中信息段被大量删除时, 数据中0, 1分布的有偏性增大、多重分形谱宽度增大; 当协议帧数据中同步字被大量删除时, 数据中0, 1分布的有偏性减小、多重分形谱宽度减小。

性质1: 对于长度一定的协议帧数据, 随着信息段的删减, 协议帧数据的有偏性和多重分形谱宽度不断增大, 直到完全删除信息段后, 协议帧的有偏性和多重分形谱宽度与同步字相等。

本文利用性质1, 对待识别序列中的信息段进行循环删减, 通过计算删减后序列中固定长度比特串浓度值的分布, 实现同步字的准确识别。

5 算法步骤

由于链路层协议帧以字节为单位进行传输, 其中同步字长度一般大于2 byte, 因此我们设置序列分割长度 $\varphi=16$ bit, 字符串浓度检测长度 $l=16$ bit, 删减次数 $n_1 = 50$ 次, 单次删减行数 $n_2 = 200$ 行对同步字进行识别, 为了保证删减过程的持续待识别序列长度应该满足 $L \gg n_1 n_2 \varphi$, 步骤如下:

步骤 1 计算待识别序列 I_1 的多重分形谱宽度 α_1 , 按照设置的序列分割长度 φ 将长度为 L 的待识别序列 I_1 划分成 $\lfloor L/\varphi \rfloor$ 行、 φ 列的矩阵 Z ;

步骤 2 随机选取矩阵 Z 中的200行进行删减, 将删减后的矩阵重新排列成序列 I_2 ;

步骤 3 计算 I_2 的多重分形谱宽度 α_2 并比较 α_1 与 α_2 的大小;

步骤 4 若 $\alpha_1 < \alpha_2$, 对 I_2 进行上述删减得到 I_3 , 反之重新对 I_2 进行删减直到满足 $\alpha_1 < \alpha_2$;

步骤 5 重复上述过程并完成50次删减得到序列 I' , 按照浓度检测字符串长度 l' , 对序列 I' 进行分割并计算各字符串的浓度分布;

步骤 6 最大浓度对应的字符串被识别为同步字的一部分或同步字, 此时完成同步字的识别。

6 仿真实验

实验选取 CCSDS 空间链路层协议中的 Proximity-1 协议帧、TC 协议帧和局域网链路层 802.3 协议帧, 相关参数如表 1 所示。

实验 1 无误码同步字识别

分别仿真产生长度为 3×10^5 bit 的上述 3 种协议帧序列, 设置序列分割长度 $\varphi = 16$ bit、单次删减行数 200 行、删减次数 50, 对上述 3 种协议帧序列进行删减并计算相应的多重分形谱宽度值分布, 结果如图 5 所示。分别选取删减后长度为 2×10^4 bit 的上述 3 种协议帧序列, 在浓度检测字符串长度 $l' = 16$ bit 的条件下进行同步字识别, 结果如图 6 所示。

由图 5 可知, 3 种协议帧序列经过 50 次删减后, 多重分形谱的宽度都呈现出递增的趋势, 反映在序列中 0, 1 分布的有偏性是越来越高, 即 3 种协议帧序列中的信息段数据被有效删减, 同步字的浓度得到了提高。

由图 6 可知, 删减后的 Proximity-1 协议帧中字符串 1111101011110011 浓度最大, TC 协议帧中字符串 1100010111000101 浓度最大, 802.3 协议帧中字符串 1010101010101010 浓度最大。将识别的各协议帧同步字与正确值进行对比, 结果如表 2 所示。

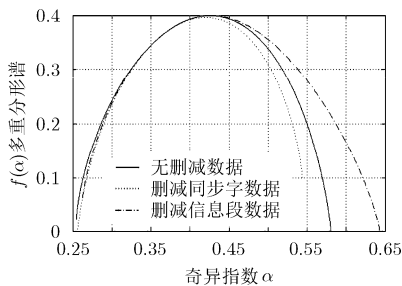


图 4 多重分形谱分布

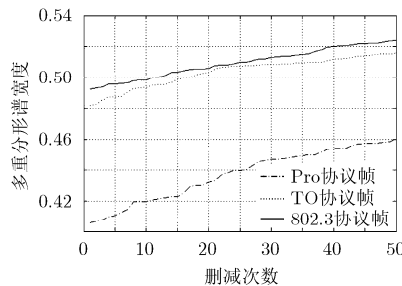


图 5 多重分形谱宽度分布

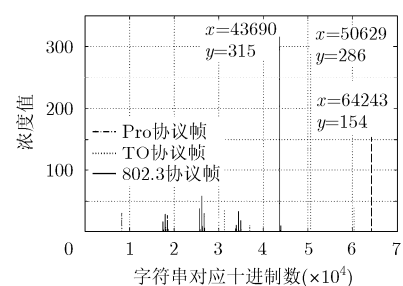


图 6 检测字符串浓度分布

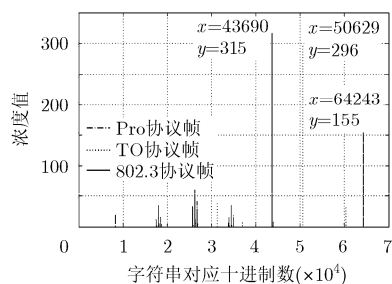


图10 检测字符串浓度分布

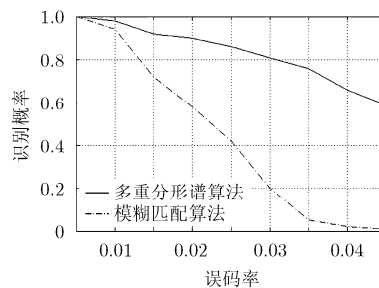


图11 多重分形谱分布

7 结论

本文针对协议类型未知条件下非等帧长同步字的盲识别问题,提出了一种基于多重分形谱的同步字盲识别算法。在分析得出协议帧与同步字都具有分形特性的基础上,通过理论证明得出协议帧中0,1分布的有偏性低于同步字的结论。利用上述结论对待识别序列中的信息段进行有效删减,达到提高同步字浓度的目的;最后,在完成删减的基础上计算待识别序列中固定长度比特串浓度值的分布,实现同步字的准确识别。仿真试验验证了本文算法的有效性,表明算法具有较好的抗误码性能和一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] 张永光, 娄才义. 信道编码及其识别分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 1-2.
ZHANG Yongguang and LOU Caiyi. Channel Coding and Recognition Analysis[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 1-2.
- [2] 李相迎. CCSDS 数据链路层协议识别关键技术研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院研究生院, 2011: 1-2.
LI Xiangying. Key technologies of protocol identification for CCSDS data link layer[D]. [Ph.D. dissertation], Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, 2011: 1-2.
- [3] HUANG S, HE J, ZENG X, et al. Accurate frame synchronization for IEEE 802.16d system[C]. 2009 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing, Nanjing, China, 2009: 1-3. doi: 10.1109/WCSP.2009.5371458.
- [4] MEHRABI M, LAFOND S, and WANG L. Frame synchronization of live video streams using visible light communication[C]. International Symposium on Multimedia, Miami, Florida, USA, 2015: 128-131. doi: 10.1109/ISM.2015.26.
- [5] QIN J, HUANG Z, LIU C, et al. Novel blind recognition algorithm of frame synchronization words based on soft-decision in digital communication systems[J]. *Plos One*, 2015, 10(7): 135-144. doi: 10.1371/journal.pone.0132114.
- [6] LIANG Y, RAJAN D, and ELIEZER O. Sequential frame synchronization based on hypothesis testing with unknown channel state information[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(8): 2972-2984. doi: 10.1109/TCOMM.2015.2438895.
- [7] 郭凯丰, 王萌. 基于等帧长信号的帧头检测方法研究[J]. 信号与信息处理, 2014, 44(6): 33-36.
GUO Kai-feng and WANG Meng. Research on detection of frame head on fixed frame length[J]. *Journal of Signal and Information Processing*, 2014, 44(6): 33-36.
- [8] 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.
ZHANG Yu and YANG Xiaojing. Recognition method of concentratively inserted frame synchronization[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(5): 554-560.
- [9] 白彧, 杨晓静, 王懋. 基于相关滤波和哈达玛变换的帧同步码识别[J]. 探测与控制学报, 2011, 33(3): 69-72.
BAI Yu, YANG Xiaojing, and WANG Mao. Recognition method of frame synchronization codes based on relativity filter and hadamard transformation algorithm[J]. *Journal of Detection and Control*, 2011, 33(3): 69-72.
- [10] 王和洲. 面向比特流的链路协议识别与分析技术[D]. [硕士学位论文], 中国科学技术大学, 2014: 11-15.
WANG Hezhou. Research on bit-stream oriented link protocol identification and analysis techniques[D]. [Master dissertation], University of Science and Technology of China, 2014: 11-15.
- [11] 张一嘉. 局域网链路层数据帧识别算法的设计与实现[J]. 通信对抗, 2007, (4): 41-44.
ZHANG Yijia. Design and implementation of algorithm for LAN data frame recognition[J]. *Communication Countermeasures*, 2007, (4): 41-44.
- [12] YADAV R P, KUMAR M, MITTAL A, et al. Fractal and multifractal characteristics of swift heavy ion induced self-affine nanostructured BaF₂ thin film surfaces[J]. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2015, 25(8): 083115. doi: 10.1063/1.4928695.
- [13] DECROUEZ G, HAMBLY B, and JONES O D. The haus-

- dorff spectrum of a class of multifractal Processes[J]. *Stochastic Processes and Their Applications*, 2014, 125(4): 1541-1568. doi: 10.1016/j.spa.2014.11.007.
- [14] FAN A H, JORDAN T, LIAO L, *et al.* Multifractal analysis for expanding interval maps with infinitely many branches[J]. *Transactions of the American Mathematical Society*, 2013, 367(3): 1847-1870. doi: 10.1090/S0002-9947-2014-06141-2.
- [15] OROZCODUQUE A, NOVAK D, KREMEN V, *et al.* Multifractal analysis for grading complex fractionated electrograms in atrial fibrillation[J]. *Physiological Measurement*, 2015, 36(11): 2269-2284. doi: 10.1088/0967-3334/36/11/2269.
- [16] 谢希仁. 计算机网络[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 1-2.
XIE Xiren. Computer Network[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 1-2.
- [17] 姚秀娟, 李雪. CCSDS 空间链路层协议识别技术研究[J]. 航天电子对抗, 2012, 28(2): 26-28.
YAO Xiujuan and LI Xue. Protocol recognition technology for the CCSDS space data link layer[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2012, 28(2): 26-28.
- [18] LIU X B, KOH S N, CHUI C C, *et al.* A study on reconstruction of linear scrambler using dual words of channel encoder[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2013, 8(3): 542-552. doi: 10.1109/TIFS.2013.2246515.
- [19] 孙霞, 吴自勤, 黄昀. 分形原理及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006: 1-2.
SUN Xia, WU Ziqin, and HUANG Jun. Fractal Principle and Application[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2006: 1-2.
- 李歆昊: 男, 1989 年生, 博士, 主要研究方向为信道编码识别.
张 旻: 男, 1966 年生, 教授, 博士, 主要研究方向为通信信号处理、智能计算.
韩树楠: 男, 1989 年生, 博士, 主要研究方向为信道编码识别.