

基于可加性模糊系统原理的差分跳频 G 函数算法

刘忠英¹, 万 谦¹, 姚富强²

(1. 解放军理工大学通信工程学院, 江苏南京 210016; 2. 总参第 63 研究所, 江苏南京 210016)

摘 要: 差分跳频是 CHESSE 电台的核心技术, 它主要归结于一种 G 函数算法, 这种 G 函数集跳频图案、信息调制与解调于一体. 本文提出了一种新的基于可加性模糊系统的 G 函数算法, 并对该算法产生的跳频图案进行了检验. 结果表明, 该算法产生的跳频图案具有良好的随机性和均匀性, 并具有对初始条件的鲁棒性. 同时, 分析表明该算法具有较高的复杂度、较强的隐蔽性和抗破译性.

关键词: 差分跳频; G 函数; 可加性模糊系统

中图分类号: TN97 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372 2112 (2002) 05 0647 04

DFH G Function Algorithm Based on Additivity Fuzzy System Principle

LIU Zhong-ying¹, WAN Qian¹, YAO Fu-qiang²

(1. Institute of Communication Engineering PLA UST, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

2. The 63rd Research Institute of PLA General Staff Headquarters, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: DFH which comes down to a kind of G function algorithm is the key technique of CHESSE radio. This algorithm can generate FH pattern and realize the information's modulation and demodulation at the same time. A new G function algorithm based on additivity fuzzy system principle is put forward and the test of its FH pattern is done in this paper. The conclusion shows that this algorithm whose FH pattern has better randomness and uniformity, and is robust to initial condition. The analysis also shows it has high complexity and good stealthiness.

Key words: differential frequency hopping; G function; additivity fuzzy system

1 引言

自从美国 Sanders 公司成功研制 CHESSE (Correlated Hopping Enhanced Spread Spectrum) 电台以来^[1], CHESSE 电台全新的设计思想——差分跳频 (DFH: Differential Frequency Hopping) 以及其实现 DFH 的多项先进技术如异步跳频、宽带接收、DSP 等在国内受到了广泛关注. CHESSE 电台从高速跳频出发, 跳速高达 5000 跳/秒, 采用差分跳频新体制使短波数传速率可达 19.2 Kbps. 采用全新设计思想的 CHESSE 电台不仅改变了短波电台由于信道带宽窄、空中信道时变多径特性而导致的低速率数据传输的局面, 而且极大地提高了抗跟踪干扰的能力, 代表了新一代短波通信技术. 差分跳频是 CHESSE 电台的核心技术, 它主要归结于一种 G 函数算法, 这种 G 函数集跳频图案、信息调制与解调于一体. 文献[2]对一种简单的 G 函数算法进行了研究, 该算法的跳频图案随机性和二维连续性较差, 为此需要寻找新的 G 函数算法.

模糊理论中, 可加性模糊系统在模糊规则的作用下可在一个紧域上连续地逼近任意一个实连续函数或实边界可测函数^[3,4]. 而 G 函数产生的跳频图案是一个随机序列, 因此可以利用可加性模糊系统对随机序列的逼近来构造 G 函数. 针对

文献[2]中的 G 函数算法的缺陷, 本文提出了一种新的基于可加性模糊系统的 G 函数算法, 并对该算法产生的跳频图案进行了检验. 结果表明, 该算法产生的跳频图案具有良好的随机性和均匀性, 并具有对初始条件的鲁棒性. 同时, 分析表明该算法具有较高的复杂度、较强的隐蔽性和抗破译性.

2 可加性模糊系统原理^[4]

可加性模糊系统在模糊规则的作用下可在一个紧域上连续地逼近任意一个实连续函数或实边界可测函数. 此特性使它广泛的应用于信号处理、控制、通讯、模式识别等多种领域. 图 1 即是可加性模糊系统的原理框图, 该系统的目的是向函数 $Y = F(x)$ 逼近. 虚线框内即是该系统中最重要的一块: 标准可加性模型. 此模型储存了 m 条模糊规则, 这些规则就是整个系统向函数逼近的保证. 模糊规则的形式为: “如果 x 属于 A_j , 则输出为 B_j ”, 其中 A_j, B_j 为输入模糊集, $1 \leq j \leq m$. 系统的输入 x 进入标准可加性模型之后, 将同时作用于这 m 条平行的模糊规则. 之后, 标准可加性模型将所有规则的输出相加, 得到总的输出模糊集 B :

$$B = \sum_{j=1}^m B_j = \sum_{j=1}^m a_j(x) B_j \quad (1)$$

其中 $a_j(x)$ 为 x 对模糊集 A_j 的隶属度.

可加性模糊系统接着对 B 进行非模糊化, 最终得到输出 $Y = F(x)$.

对于不同的应用, 模糊集 A_j, B_j 的形式和非模糊化的方法都不尽相同, 但共同的一点是: 标准可加性模糊型中的模糊规则要能对函数 $Y = F(x)$ 进行较好的描述. 模糊规则对函数的描述作用越强, 模糊系统就越逼近函数. 如果用随机序列对规则进行训练, 那么所生成的规则也将能产生出随机序列, 也就是说, 由此构成的模糊系统将能很好地逼近一个随机序列. 根据这点即可以利用可加性模糊系统来构造符合一定条件的 G 函数.

3 基于可加性模糊系统原理的 G 函数算法

差分跳频 G 函数的核心内容即是利用跳频频率的相关性来携带待发送的数据信息, 同时其所产生的跳频序列应具有有良好的随机性和均匀性. 针对 G 函数的核心内容就可以利用可加性模糊系统对函数的逼近特性来构造新的 G 函数. 一般认为, G 函数表达式为: $f_k = G(f_{k-1}, X)$, 是利用前后跳频率 f_k, f_{k-1} 之间的相关性来携带信息 X . 本文对此进行了扩展.

本文提出的 G 函数是由前一跳的频率 f_{k-1} , 前 r 跳的频率 f_{k-r} 和当前的信息 X 来决定当前的频率值 f_k . 数学表达式为:

$$f_k = G(f_{k-1}, f_{k-r}, X) \quad (2)$$

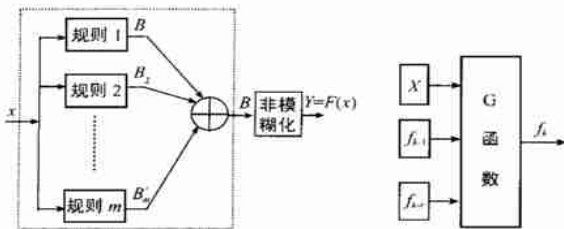


图 1 可加性模糊系统原理图 图 2 G 函数原理图

其频率、数据的变换关系可表示为图 2 的形式. 利用 f_k, f_{k-1} 和 f_{k-r} 三个频率的相关性来携带信息将大大提高 G 函数的复杂度, 并增加信息的隐蔽程度.

在进行 G 函数算法之前需要首先完成两步准备工作.

第一步是对频率集进行划分. 假设 G 函数生成的跳频序列来自于含 N 个频率的频率集. 将整个频率集划分为 n 个频率段, 每个频率段含有 N/n 个频率. N 必须是 n 的倍数以便均匀划分频率集. 这样划分的目的是为了将输出频率的确定分为两个阶段. 第一个阶段是使输出频率随机、均匀地分布于 n 个频率段; 第二个阶段是使输出频率在每个频率段内所有频率之间均匀分布.

第二步是生成模糊规则. 如前所述, 模糊规则要能很好地描述随机跳频序列, 需要采用具有较好随机性和均匀性的跳频序列来训练生成规则. 基于这样的模糊规则, G 函数将能产生出随机性和均匀性都很好的跳频序列.

模糊规则具有两个模糊集, A_j 和 B_j . 在对频率集进行分段划分之后, A_j 和 B_j 都变成了 n 维向量, 每一维对应一个频

率段. 生成规则时, 不断对时刻 k 之前训练序列中频率分布情况及 k 时刻频率所属频率段进行统计, 经过长度在 10000 以上的序列训练之后, 最终可得 m 条规则^[4]. 由此可知, 输入模糊集 A_j 描述的是当前时刻 k 之前跳频序列中频率的分布情况, 而输出模糊集 B_j 描述的是 k 时刻输出频率的分布概率. 其中 A_j 对于频率分布是以大(L)、中(M)、小(S)三个模糊集来进行描述的, 因此 n 维向量 A_j 就有形如 (L, M, M, \dots, S, M) 的形式^[4]. 由于进行了频率集的分段划分, 所生成的规则只与所分的段数 n 有关. 即同样的规则可用于产生不同频率数的序列, 只需频率集的分段数 n 相同即可.

模糊规则生成之后将存储于 G 函数的标准可加性模型之中, 不再修改. 此外, 为了更好地达到 G 函数关于随机性、均匀性的要求, 一个检查模糊规则的方法是: 如果所生成的规则具有类白噪声的协方差矩阵, 那它将能产生出良好的效果.

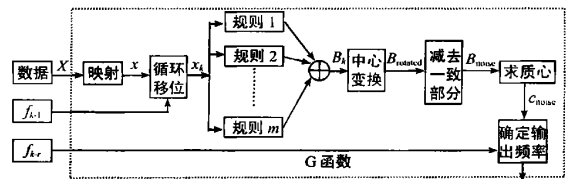


图 3 G 函数算法框图

在以上准备工作之后, 下面将开始本文的 G 函数算法. 该算法框图如图 3 所示.

(1) 将数据映射到输入 x . 设 BPH (Bits per Hop) 代表每跳携带的信息比特数. 那么从输入二进制信息流中取出 BPH 个比特, 将这些比特映射成 n 个十进制数以组成 n 维输入向量 x , 则有:

$$x = AX \quad (3)$$

其中 X 是 BPH 维的向量, 每一维代表一个二进制比特, A 为映射关系矩阵.

(2) 对 x 循环移位. 先找出 $x[i]$, ($i = 1, 2, \dots, n$) 中的最大值, 再找出前一跳频率 f_{k-1} 所属的频率段 D_{k-1} , 对 x 循环移位, 将它的最大值移位频率段 D_{k-1} , 这就形成了标准可加性模型的输入向量 x_k .

(3) 求 k 时刻的合成输出模糊集 B_k . 根据式 (1) 可求出 B_k , 此时 $a_j(x_k) = \min_i (a_{A_j[i]}(x_k[i]))$, 其中 $a_{A_j[i]}(x_k[i])$ 表示 $x_k[i]$ 对 $A_j[i]$ 的隶属度.

(4) 对 B_k 进行中心变换. 先找出 n 维向量 B_k 中最大项和最小项的指数 i_{max} 和 i_{min} , 再变换 B_k 使 i_{max} 成为中心频率段. 图 4 表示的是当 $n = 5$ 时中心变换的情况. 变换之后得到 $B_{rotated}$, 它的质心为:

$$c_{rotated} = \frac{\sum_i B_k[i] \cdot d_i}{\sum_i B_k[i]} \quad (4)$$

其中 d_i 表示第 i 个

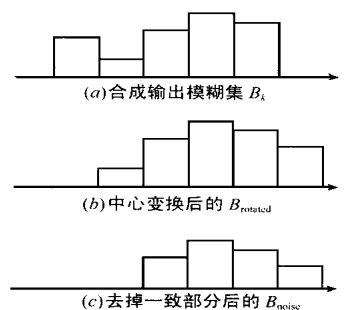


图 4 G 函数中对 B_k 的处理示意图

频率段变换之后的中心.

(5) 去掉 $B_{rotated}$ 中的一致部分. 去掉一致部分 $B_{uniform}$ 之后就输出模糊集中的“噪声”部分 B_{noise} 分离出来了, 如图 4 所示. 其中一致部分的质心为:

$$c_{uniform} = \frac{\sum_i B_k[i_{min}] \cdot d_i}{\sum_i B_k[i_{min}]} = \frac{1}{n} \sum_i d_i \quad (5)$$

(6) 求出 B_{noise} 的质心:

$$c_{noise} = \frac{\sum_i B_{noise}[i] \cdot d_i}{\sum_i B_{noise}[i]} = \frac{c_{rotated} - \left(\frac{n B_k[i_{min}]}{\sum_i B_k[i]} \right) \cdot c_{uniform}}{1 - \frac{n B_k[i_{min}]}{\sum_i B_k[i]}} \quad (6)$$

(7) 确定输出频率 f_k :

$$f_k = \lfloor c_{noise} \cdot \frac{N}{2n} + \frac{f_{k-r}}{n} \rfloor \pmod{N} \quad (7)$$

其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整, f_{k-r} 为前 r 跳频率, 它的加入是为了增强 G 函数算法的复杂性和信息的隐蔽性, 因为不同的 r 将导致不同的跳频序列. n' 用于调整 f_{k-r} 对输出频率的影响程度.

(8) 回到步骤(1), 重复.

本算法采用了可加性模糊系统理论, 这使得本算法具有较大的灵活性: (1) 本算法能生成均匀分布在任何频率集大小之上的跳频序列. 而且对频率集进行分段之后, 在 n 不变, 改变 N 时, 模糊规则不必改变. 另外传统的跳频图案产生算法要求频率集大小必须是 2 的整数次幂, 而本算法没有此限定, 因此具有更大的应用灵活性. (2) 本算法中由于 f_{k-r} 的参与使跳频序列不仅仅决定于信息序列和前一跳频率, 同时还受到前 r 跳频率及其参与度 n' 的影响, 不同的 r 和 n' 将产生完全不同的跳频序列, 这不仅使算法具有灵活多变的特点, 而且使

G 函数算法具有较高的复杂度和隐蔽性.

4 G 函数算法检验及结果

为了对算法的性能进行描述, 对所生成的跳频序列进行检验.

4.1 检验模型

检验模型如图 5 所示. 其中数据流为 0、1 均匀分布的二进制序列, Y_k 代表跳频码序列. 初始条件要能够进行任意调整、设置.

4.2 检验方法及结果

对 Y_k 进行随机性、一维均匀性、二维连续性检验.

随机性检验采用平滑周期图平均法, 一维均匀性、二维连续性检验采用统计学中的 χ^2 检验, 具体方法参阅文献[2].

检验条件: 检验跳频序列长度 $L = 16384$, 对于 G 函数, 取 $N = 65, n = 5, BPH = 4, r = 10$, 式(3)中的一种映射关系矩阵为:

$$A = \begin{pmatrix} 4 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 4 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 4 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 2 & 4 \end{pmatrix} \quad (8)$$

检验结果: 下图即是随机性检验的结果, 图 6 为新的 G 函数跳频码序列功率谱线图, 图 7 为文献[2]中 G 函数跳频码序列功率谱线图. 从图中可知, 本文的 G 函数算法其随机性比文献[2]的有很大改善, 有类白噪声的特性, 这也说明了该算法的隐蔽性较强.

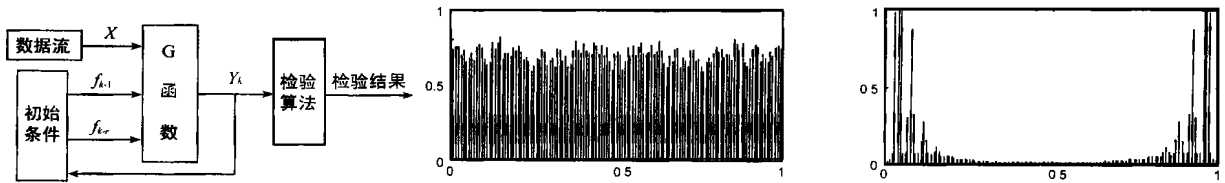


图 5 检验模型

图 6 新的 G 函数跳频码序列功率谱线图

图 7 文献[2]中 G 函数跳频码序列功率谱线图

表 1 一维均匀性和二维连续性检验结果

初始条件	一维均匀性检验		二维连续性检验	
	χ^2 理论值	χ^2 计算值	χ^2 理论值	χ^2 计算值
1	83.39122	67.5460	4376.04095	4311.38
2	83.39122	53.0178	4376.04095	4034.94
3	83.39122	52.8988	4376.04095	4258.26
4	83.39122	49.7408	4376.04095	4174.71

在产生第一跳的频率时, 它的前一跳和前 r 跳都是空白, 这就存在一个初始条件的选取问题, 不同的初始条件将导致不同的结果, 表 1 即是在不同初始条件下的一维均匀性和二维连续性检验的理论值和结果. 其中初始条件 1 是采用的全零初始条件, 其它初始条件均采用 65 个频率比较均匀的序列. 从表中可看出, 对于各种初始条件, 本文 G 函数算法的 χ^2 检验值均小于理论值, 这说明该算法所产生的跳频序列具有良好的均匀性和连续性. 同时, 在不同的初始条件下, G 函数均

能生成性能良好的跳频序列, 这说明这种 G 函数算法对初始条件具有鲁棒性.

从本文的算法和检验可知, 这种 G 函数算法从模糊规则, 数据映射方法, r, n' , 初始条件等多个方面来确定跳频序列的产生, 如果对这些方面没有完全了解, 就无法对序列进行预测. 另外, 由于模糊系统的非线性, 又使本文的 G 函数算法具有较强的抗破译性.

5 结束语

DFH 是当前高速短波跳频电台研究的热点^[5-7], 它主要由 G 函数算法决定. 本文在文献[2]所作研究的基础上提出了一种基于模糊的差分跳频 G 函数算法, 该算法将原 DFH 的 G 函数表达式 $f_k = G(f_{k-1}, X)$ 扩展为 $f_k = G(f_{k-1}, f_{k-r}, X)$, 利用 f_k, f_{k-1} 和 f_{k-r} 三个频率的相关性来携带信息, 大大提高了 G

函数的复杂度,增加了信息的隐蔽程度;而且该算法从模糊规则,数据映射方法, r, n' , 初始条件等多个方面来确定跳频图案的产生,如果对这些方面没有完全了解,就无法对跳频图案进行预测.可见,本文的 G 函数算法具有较强的抗破译性.同时,它能生成均匀分布在任何频率集大小之上的跳频图案,且这些跳频图案具有良好的随机性和均匀性.

参考文献:

- [1] Hernick D L, Lee P K. CHES: A new reliable high speed HF radio [A]. MILCOM '96 [C]. 1996. 684- 690.
- [2] 姚富强, 刘忠英. 短波高速跳频 CHES 电台 G 函数算法研究 [J]. 电子学报, 2001, 29(5): 664- 667.
- [3] Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators [J]. IEEE Transactions on Computers, 1994, 42(11): 1329- 1333.
- [4] Kosko B. 模糊工程 [M]. 黄崇福译. 西安: 西安交通大学出版社, 1999.
- [5] CHES: 一种新型可靠的高速短波电台 [J]. 外军电信动态, 1997(4): 33- 38.
- [6] 李玉生, 王治元, 姚富强. 相关跳频通信技术 [J]. 现代军事通信, 1999, 7(3): 7- 8.
- [7] 潘武, 周世东, 姚彦. 差分跳频通信系统性能分析 [J]. 电子学报, 1999, 27(11A): 102- 104.

作者简介:



刘忠英 女, 1973 年 12 月生于湖北潜江, 于 1998 年 2 月在解放军通信工程学院获工学硕士学位, 现为解放军理工大学博士研究生, 研究领域: 通信抗干扰、光纤通信.



万 谦 男, 1973 年 1 月生于四川自贡, 于 1997 年于解放军通信工程学院获工学硕士学位, 现为解放军理工大学博士研究生, 研究领域为知识发现、数据仓库与数据挖掘、光纤通信.

姚富强 男, 1957 年 5 月生于安徽枞阳, 于 1993 年 3 月在西安电子科技大学获工学博士学位, 现为解放军理工大学研究员, 博士生导师, 中国电子学会会员, 已发表学术论文 100 余篇, 研究领域: 通信抗干扰技术与体制.