

基于频率分组的 CHES 系统 G 函数算法研究

岑翼刚 孙德宝 尉宇
(华中科技大学控制科学与工程系 武汉 430074)

摘要 该文在现有研究结果的基础上,针对 CHES 系统提出了一种新的 G 函数算法,该算法将总频率集中的频点随机分为 $m = 2^{\text{BPH}}$ 个子频率集,根据待发送的信息以及信息码与子频率集的对应关系得出下一跳的频点,由检验结果看出该方法在以往的基础上提高了系统的一维均匀性、二维连续性及随机性,取得了较好的效果。

关键词 短波跳频, CHES 系统, G 函数, 频率分组

中图分类号: TN971.+1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)04-0663-04

The G Function Algorithm for CHES System Based on Frequency Grouping

Cen Yi-gang Sun De-bao Wei Yu

(Dept. of the Control Science & Engineering, HuaZhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract On the basis of existing references, this paper proposes a new G function algorithm for the HF high speed FH CHES radio system. In the algorithm, the frequencies are grouped into $m = 2^{\text{BPH}}$ subsets. The next hopping frequency is chosen according to the coding series and the corresponding relationship between the codes and the frequency subsets. The performance test results show that the algorithm has more superiority in 1-dimensional uniformity, 2-dimensional continuity and randomness of the hopping series compared with previous G function algorithm.

Key words HF frequency hopping, CHES system, G function, Frequency grouping

1 引言

近年来,美国 Sanders 公司推出了一种相关跳频增强新扩谱电台(Correlated Hopping Enhanced Spread Spectrum),简称 CHES 电台^[1-3],它有跳速快、传输率高的特点。其跳频速度达 5000 跳/秒,数据传输率最低为 2400bps,最高达 19200bps,每跳驻留时间仅为 200 μs 。较好地解决了提高数据速率和抗跟踪干扰的能力。

在战场通信的很多重要的应用中,CHES 系统具有很大的发展潜力,其高数据传输率可以用于电子监视中的图像采集传输及其它传感器信号传输。适当地选择跳速和信息长度可以使得信号与噪声具有极其相似的特征。这种系统已用于遥控飞行器的命令发送和控制中。

差分跳频是 CHES 电台的核心技术,其主要归结于一种 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。G 函数算法应该具有一维均匀性、二维连续性、随机性及可逆性。姚富强等人^[4]介绍了一种实现简单可行的 G 函数算法,该算法能满足一维均匀性的要求,但作者指出其二维连续性和随机性较差,因此寻找性能优越的 G 函数算法

或对差分跳频作适当处理以改善跳频图案的随机性是需要解决的问题。刘忠英等^[5]介绍了一种基于可加性模糊的 G 函数算法,该算法满足一维均匀性、二维连续性及随机性的要求,取得了较好的效果,但是较为复杂。杨裕亮等^[6]提出了一种简单的 G 函数,但没有给出该函数是如何构造的。因此,有必要寻找一种简单且满足上述 G 函数性质的新算法。在本文中,提出了一种基于频率分组的 G 函数算法,该算法容易实现,且具有较好的均匀性与随机性,二维连续性也优于已有的结果。

2 G 函数算法

定义 当前时刻的频率值 f_n ,由上一跳的频率值 f_{n-1} 和当前时刻的信息符号 X_n 决定,数学表达式为^[3]

$$f_n = G(f_{n-1}, X_n) \quad (1)$$

在发送端,通过频率和数据序列的相关编码,从频率集中映射出要发送的频率。设当前频率集中频率个数为 N ,每跳携带 BPH 比特数据,扇出系数为 $m = 2^{\text{BPH}}$ 。在研究中,我们提出了以下的编码方案,称之为随机分组编码法。

根据扇出系数将频率集中的各个频点进行分组,即将频率集 F 分为 m 个子频率集,每个子频率集包含 N/m 个频点。分组的方法为:从总频率集 F 中随机抽取 N/m 个频点出来放到 F_1 中作为第一个分组,并将这 N/m 个频点进行随机排

列；从 F 中剩下的频点中再随机抽取 N/m 个频点并随机排列组合作为 F_2 ，依此类推得到 m 个子频率集。若频率集 $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_N\}$ ，则记 m 个分组(子频率集)为

$$F_1 = \{f_{i_1}, f_{i_2}, f_{i_3}, \dots, f_{i_{N/m}}\}, F_2 = \{f_{j_1}, f_{j_2}, f_{j_3}, \dots, f_{j_{N/m}}\}, \dots, F_m = \{f_{k_1}, f_{k_2}, \dots, f_{k_{N/m}}\}$$

频率点映射规则如下：

(1) 随机产生一个初始频率 f_s ，并找出该初始频率所属的组。

(2) 初始化信息码与子频率组的对应关系，如表 1 所示(为叙述方便，以 $BPH = 2$ 为例)，初始化标志各个子频率集中频点使用情况的位置向量 $p_i, i = 1 \dots m$ ，例如初始频点 $f_s \in F_2$ 且 f_s 是 F_2 中的第 6 个频点，则 $p = [0 \ 6 \ 0 \ 0]$ 。

表 1 初始化的信息码与子频率集对应关系

Tab.1 The initialization of the corresponding relationship between the frequency subsets and information codes

00	01	10	11
F_1	F_2	F_3	F_4

(3) 每次传输一个信息码，则该信息码对应的分组变为 $F_{\text{mod}(i+1,m)}$ (其中 $\text{mod}(x,y)$ 表示 x 以 y 为周期，若 $x > y$ 则 $x = x - y$ ，否则 x 不变)，即将表 1 第 2 行中对应于该待传输信息的子频率集序号加 1 作为目前时刻待传输的信息码与分组对应关系，其余的信息码与分组对应关系不变。例如，在表 1 的基础上，若第 1 个信息码为 01 时，对应关系如表 2 所示。

表 2 传送第一个信息码时信息码与子频率集对应关系

Tab.2 The corresponding relationship between the frequency subsets and information codes when the first information code is transmitted

00	01	10	11
F_1	F_3	F_3	F_4

(4) 根据待传输的信息码找到其对应的子频率集，再由 p_i 确定将使用的频点。此时应该注意，由表 2 看到，01、10 都是对应着 F_3 ，这时如果下一跳是 01 或 10，则都对应对应着分组 F_4 ，这样会给接收方造成混淆(即接收方此时虽然接收到了 F_4 中的频点，但是不能判断发送的信息是 01 还是 10)。因此，此处应增加一个标志，其方法为：利用分组 F_4 的位置向量 p_4 来区分，即若发送的频点是 01，则将 p_4 加 2，若是 10，则加 1。举例说明：初始频点 $f_s \in F_2$ 且 f_s 是 F_2 中的第 6 个频点，下一跳所携带的信息码为 01，则由表 2 知其对应的频点应该为 F_3 中的第 1 个频点。若再下一跳为 01，则由上述方法知待发送的频点为 $F_4 = \{f_{p_1}, f_{p_2}, \dots, f_{p_{N/4}}\}$ 中第 2 个频点 f_{p_2} ；若下一跳为 10，则使用 F_4 中第 1 个频点 f_{p_1} 。

(5) 重复上述过程直到所有信息码发送完毕。例如： $BPH = 2$ 时，4 个子频率集分别为 $F_1 = \{f_{i_1}, f_{i_2}, f_{i_3}, \dots, f_{i_{N/4}}\}$ ， $F_2 = \{f_{j_1}, f_{j_2}, f_{j_3}, \dots, f_{j_{N/4}}\}$ ， $F_3 = \{f_{k_1}, f_{k_2}, \dots, f_{k_{N/4}}\}$ ， $F_4 = \{f_{p_1}, f_{p_2}, \dots, f_{p_{N/4}}\}$ 。信息码为 01 01 11 11 10 10 00 00，起始频率为 $f_s = f_{j_{16}} \in F_2$ ，下一信息码 $X_1 = 01$ ，对照表 2 中第 2 列的组别对应关系可知该信息码应该对应于 F_3 ，而 F_3 中的第 1

个未用的频点为 f_{k_1} ，所以 X_1 对应的频点为 f_{k_1} 。 $X_2 = 01$ ，此时 X_2 对应的频率组为 F_4 ，由上述的第 4 点知 X_2 对应的频点为 f_{p_2} ，依此类推得到信息码与频率组的对应关系如表 3，后续的频点如表 4 所示，对应于待发送的各个信息码所用到的子频率集在表中用粗斜体标出。

表 3 待发送的信息码与子频率集的对应关系

Tab.3 The corresponding relationship between the frequency subsets and information codes that prepare to be transmitted

		信息码			
		00	01	10	11
待 发 送 的 信 息 码	01	F_1	F_3	F_3	F_4
	01	F_1	F_4	F_3	F_4
	11	F_1	F_4	F_3	F_1
	11	F_1	F_4	F_3	F_2
	10	F_1	F_4	F_4	F_2
	10	F_1	F_4	F_1	F_2
	00	F_2	F_4	F_1	F_2
	00	F_3	F_4	F_1	F_2
00	F_4	F_4	F_1	F_2	

在该对应关系中，若某一个组中的每个频点均被使用了之后(即对某一个 i ，有 $p_i > N/m$)，则从该组的第 1 个频点开始重新循环使用该频率组中的频点(置 $p_i = 1$)。具体来说，若总的频点数 $N = 64$ ， $BPH = 2$ ，则每个频率组中有 16 个频点，以频率组 F_1 为例，若第 17 次使用到频率组 F_1 ，则对应的频点为 F_1 中的第一个频点 f_{i_1} 。

在接收端，首先经过 FFT 分析跳频带宽内的信号特征，得到接收的频点分别为 $\{f_{r_1}, f_{r_2}, f_{r_3}, \dots\}$ 。找出前一时间刻和当前时刻的频点所属的频率组，则得到频率组与信息码的对应关系。根据对应关系，若出现同一分组对应不同信息码的情况，则寻找出 f_{r_i} 所属的频率组(设为 F_j)在前一次使用时使用了频率组中的哪个频点(设为 $f_k \in F_j$)，根据 f_{r_i} 和 f_k 在 F_j 中的位置关系是相差 1 还是 2 即可解调出所发送的数据信息。例如， $BPH = 2$ ， $f_s = f_{j_{16}} \in F_2$ ，位置向量初始化为 $p = [0 \ 16 \ 0 \ 0]$ ，对应关系初始化为表 1。 $f_{r_1} = f_{k_1} \in F_3$ ，则可知表 1 中的 4 个频率组中的 F_2 变成了 F_3 ，因此解调出发送的信息为 01，信息码与分组对应关系变为表 2，位置向量变为 $p = [0 \ 16 \ 1 \ 0]$ ； $f_{r_2} = f_{p_2} \in F_4$ ，而 $p_4 = 0$ ，结合表 2 和上述的第 4 点可知此时的信息为 01，由此便可解调出所有的信息。

由以上分析，可以看出：

(1) 跳频序列中不会出现相邻频率相同的情况，相邻频率相同的概率为零。

(2) 跳频顺序与起始频率、数据流、频率分组情况有关，接收端必须获得起始频率和频率分组的信息，否则不能解调数据。

表 4 待发送的信息码与频点、子频率集的对应关系

Tab.4 The corresponding relationship among the information codes, frequencies and frequency subsets

X_n	起始频点	01	01	11	11	10	10	00	00	00
f_n	f_{i_6}	f_{k_1}	f_{p_2}	f_{i_1}	f_{i_2}	f_{p_3}	f_{i_3}	f_{i_2}	f_{k_3}	f_{p_4}
各频点所属的组别 F_m	F_2	F_3	F_4	F_1	F_2	F_4	F_1	F_2	F_3	F_4

(3) 在该算法中, 引入了频率分组的方法, 使得跳频密钥不仅只是流动的数据流, 还有频率的分组, 这样就相当于使用了双重密钥, 而且频率分组情况是可变的, 只要收发双方约定好即可, 这使其隐蔽性更好。由于频率的分组是将总的频率集合随机抽取后分组的, 这样做的目的是增加输出频率在总频率集内分布的随机性和均匀性, 所以跳频序列的均匀性和随机性更好。另外, 根据上述频点映射规则中的第 4 点看到, 其二维连续性将有较大的提高。

(4) 该方法轮流使用到了各个子频率集, 因此其均匀性应该比较好的。而且对于长连 0、长连 1、规律性出现 0101...01 或 101010...10 的情况而言, 其均匀性也将有所提高, 因为对这几种情况实际上是轮流使用各个频率组中的各个频点。当然, 由于在方法中使用了位置向量(即每次不一定是连续地使用到某个频率集中的频点, 见上述频点映射规则中第(4)点), 因而出现上述 4 种情况时, 一维均匀性会受到一定的影响, 但二维连续性受到的影响较小。

(5) 由CHES系统的指标^[2,4,7]可以看到, 差分跳频系统每秒 5000 跳, 其中 4800 跳用于数据传输, 而CHES系统的数据速率为 2.4/4.8/7.2/9.6/14.4/19.2 kbit/s, 在 4800 跳/秒的情况下 4800×4 = 19.2kbit/s。因此系统每跳携带的bit数为 1~4bit, 不会出现由于扇出系数太大(如BPH = 6, m = 64)导致每个频率分组中频点数过少, 而使得跳频序列出现很强的规律性的问题。

3 G 函数算法的性能检验

为了验证上述G函数方法的性能, 对跳频码序列的均匀性和随机性进行了检验, 对均匀性的检验分为两种类型, 一种是一维等分布检验, 另外一种是二维连续性检验, 检验均采用统计学中的 χ^2 检验^[4,8,9]。

3.1 一维等分布检验

CHES系统要求各跳频频率在跳频频带内均匀分布, 即信息码序列 X_n 所对应的频率号 γ_i 在 0 到(N - 1)范围内均匀分布, 其中N为总的频点个数。检验条件为: 检验跳频序列长度L=16384, 总的频点数 N = 64, 取长连 0, 长连 1 的段数h 分别为 1~4 的 4 组数据流, 信息码序列 X_n 由计算机随机产生, 其 0 和 1 出现的概率服从均匀分布。在BPH = 1 和 2 的两种情况下进行检验。

一维等分布检验: 随机序列字 γ_i 的概率密度函数应该均匀, 即每个频点上, 出现的概率应该相同, 采用 χ^2 检验, 有: 设总体 X 是离散型随机变量, 它仅取 r 个可能的值, (X_1, X_2, \dots, X_n) 是取自总体 X 的一个样本, 要检验:

$$H_0 : P(\gamma_i) = P(X = f_i) = p_i = 1/N, \quad 0 \leq \gamma_i \leq N - 1 \quad (2)$$

令 N_i 为 $X_1, X_2 \dots X_n$ 中取 f_i 值的个数, 当 H_0 成立时, 由大数定理知, 按样本观测值 (x_1, x_2, \dots, x_n) 算得取 f_i 的频数 n_i (即 N_i 的观测值)应该与 np_i 相差不大; 反之, 如果两者相差甚大, 那么自然认为 H_0 可能根本不成立。因此 Pearson 构造出反映这种差异的检验统计量

$$\chi^2(r-1) = \sum_{i=0}^{r-1} \frac{(N_i - np_i)^2}{np_i} \quad (3)$$

当实测的 $\chi^2(r-1)$ 值小于指定水平 $\alpha = 0.05$ 下, 自由度为 $r - 1$ 的 χ^2 理论值 $\chi_{0.05}^2(r-1)$ 时, 则认为各频率均匀分布的假设为真, 否则为假。

3.2 二维连续性检验

各随机序列对 $(\gamma_i, \gamma_j), i, j = 1, \dots, N$ 的概率密度应该均匀, 即第 i 个频率出现后, 接着出现第 j 个频点的概率应该相同, 即要检验:

$$H_0 : P(\gamma_i, \gamma_j) = P(X = f_j | X = f_i) = p_{ij} = 1/N^2, \quad 0 \leq \gamma_i, \gamma_j \leq N - 1 \quad (4)$$

同样采用统计学中的 χ^2 检验, 方法与一维均匀性检验相同。检验统计量为

$$\chi^2(r^2-1) = \sum_{i,j=0}^{r-1} \frac{(N_{ij} - np_{ij})^2}{np_{ij}} \quad (5)$$

当实测的 $\chi^2(r^2-1)$ 值小于指定水平 $\alpha = 0.05$ 下, 自由度为 $r^2 - 1$ 的理论值 $\chi_{0.05}^2(r^2-1)$ 时, 则认为各对连续频率均匀分布的假设为真, 否则为假。

针对本文前述 G 函数算法, 在 BPH = 1 和 2 的两种情况下进行检验, 数据流为均匀分布的 0、1 序列, 并且可设置长连 0 和长连 1 的个数, 由于每次产生的数据流不同, 导致每次结果有所偏差, 因此此处给出了一个平均的结果, 一维均匀性与二维连续性的检验结果如表 5、表 6 所示。

3.3 随机性检验

跳频序列是一种伪随机序列, 理想的伪随机序列有类似高斯白噪声的性能, 其功率谱应该是平坦的, 也就是说, 产生的跳频码序列, 如果其功率谱越平坦, 则说明其伪随机性越好。所以, 实际中可以通过估计跳频码序列 γ_i 的功率谱来评价序列的随机性。根据本文所述 G 函数算法得到的跳频码序列功率谱如图 1 所示, 其中 $h = 4$, 图中使用了归一化的频率和功率。

由以上的检验可以得出以下几点结论:

(1) 对于一维均匀性而言, 本文的 G 函数算法所检验的数据均小于指定水平下的理论值 $\chi_{0.05}^2(N-1)$, 所以 G 函数跳频码序列的一维均匀性较好。长连 0 或长连 1 的个数对系统性能是有影响的, 从表 6 中可以看出长连 0 和长连 1 的个数越多, 均匀性随之变差。

表5 G函数跳频码序列一维等分布检验

Tab. 5 1-dimensional uniformity verification of the G function frequency hopping series

数据流	χ^2 理论值	BPH=1 时的 χ^2 计算值	BPH=2 时的 χ^2 计算值	参考值 BPH=1	参考值 BPH=2
$X_n(h=1)$	82.2447	10.4625	13.5250	0	0
$X_n(h=2)$	82.2447	15.6547	28.6563	19.4688	33.2266
$X_n(h=3)$	82.2447	20.6094	34.1625	24.6641	42.2266
$X_n(h=4)$	82.2447	27.7063	38.4031	20.8047	42.1641

表6 G函数跳频码序列二维连续性检验

Tab. 6 2-dimensional continuity verification of the G function frequency hopping series

数据流	χ^2 理论值	BPH=1 时的 χ^2 计算值	BPH=2 时的 χ^2 计算值	参考值 BPH=1	参考值 BPH=2
$X_n(h=1)$	4244.7142	69776	13624	507904	1032190
$X_n(h=2)$	4244.7142	67104	14156	510612	275338
$X_n(h=3)$	4244.7142	65895	15012	510823	254848
$X_n(h=4)$	4244.7142	64704	16108	510432	250736

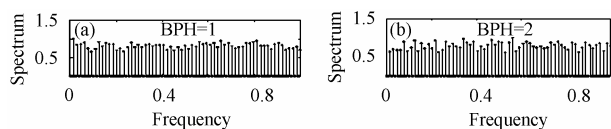


图1 跳频码序列功率谱

Fig. 1 The spectrums of the frequency hopping codes

(2) 由表5知,本文的G函数算法的二维连续性大于指定水平下的理论值 $\chi_{0.05}^2(N^2 - 1)$, 但是在以往结果的基础上有较大改善^[4].

(3) 由功率谱图1可知,本文G函数算法得到的功率谱比较平坦,说明了跳频序列有类似白噪声的特性,因而随机性较好,具有较强的隐蔽性,在现有研究结果的基础上有明显改进。

4 结论

本文在以往文献的基础上探讨了 CHES 系统中的核心技术,提出了一种新的G函数算法,并对其性能进行了检验。该方法将流动密钥与固定密钥相结合,利用频率的分组及前后频率的相关性携带信息,极易实现高跳速和高数据传输率。检验结果表明,该方法的一维均匀性较好,二维连续性欠缺,但是在以往的基础上有了一定的进步,而跳频序列的随机性较好,有类似白噪声的特性。今后继续探索新的G函数算法,使得其实现简单且具有更优越的均匀性、连续性和随机性性能指标仍是一个非常值得深入研究的问题。

参考文献

[1] Perry B D. A new wideband HF technique for MHz-bandwidth

spread-spectrum radio communications. *IEEE Communications Magazine*, 1983, 21(9): 28 – 36.

- [2] Dr. Herrick D L, Dr. Lee P K. CHES: A new reliable high speed HF radio [A]. Military Communications Conference[C], McLean, VA, Oct. 1996, Vol. 3: 21 – 24.
- [3] Dr. Herrick D L, Dr. Lee P K. Correlated frequency hopping: an improved approach to HF spectrum communications [A]. Proceedings of the 1996 Tactical Communications Conference[C]. Washington DC, 30 April – 2 May, 1996: 319 – 324.
- [4] 姚富强, 刘忠英. 短波高速跳频 CHES 电台 G 函数算法研究. 电子学报, 2001, 29(5): 664 – 667.
- [5] 刘忠英, 万谦, 姚富强. 基于可加性模糊系统原理的差分跳频 G 函数算法. 电子学报, 2002. 30(5): 647 – 650.
- [6] 杨裕亮, 何遵文, 匡镜明. 差分跳频系统的转移函数研究[J]. 通信学报, 2002, 23(4): 103 – 108.
- [7] 姚富强, 短波差分跳频有关系统及技术问题分析. 电讯技术, 2004, (6): 114 – 118.
- [8] 扈新林, 姚富强. 跳频码序列性能检验探讨. 军事通信技术, 1995, (54): 13 – 16.
- [9] 于寅. 高等工程数学. 湖北武汉: 华中理工大学出版社, 1995: 472 – 516.

岑翼刚: 男, 1978 年生, 博士生, 从事信号处理、小波分析等方面的研究.

孙德宝: 男, 1941 年生, 教授, 博士生导师, 从事人工智能、信号处理等方面的研究.

尉宇: 男, 1970 年生, 博士生, 从事信号处理、脉内分析等方面的研究.