

基于 Markov 过程的宽间隔跳频地址码序列的概率分布及谱特性的研究

关胜勇, 姚富强

(南京电讯技术研究所, 江苏南京 210007)

摘 要: 本文给出了和宽间隔跳频地址码序列相对应的 Markov 过程模型, 并基于此模型研究了具有实对称特性的 q 元宽间隔跳频地址码序列的一步转移概率矩阵 P 和 n 步转移概率矩阵 $P^{(n)}$ 及 n 步转移概率 $p_{ij}^{(n)}$, 给出了最小间隔 $d=1$ 时 $p_{ij}^{(n)}$ 的解析表达式和 $d>1$ 时以用正交矩阵和特征矩阵来表示的 $p_{ij}^{(n)}$ 一般表达式. 然后, 根据一般形式的 $P^{(n)}$ 定义了 q 元宽间隔跳频地址码序列的自相关函数和 N 步谱. 最后给出了谱分析的理论推导和计算的结果.

关键词: 宽间隔跳频地址码; Markov 链; 统计检验; 谱分析

中图分类号: TN914.141 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 07-0998-04

A Study of the Stochastic and Spectral Distribution for the Wide Interval Frequency Hopped Pattern Based on the Markov Process

GUAN Shengyong, YAO Fuqiang

(Nanjing Telecommunication Institute, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract: In this paper, a model based on the Markov chain is given for the wide interval frequency hopped sequence of q states (q WDFHS). Based on the model, the probability distribution of the q WDFHS can be written out through its 1-step and n -step transition probability matrices P and $P^{(n)}$. By deriving the analytical expression of $p_{ij}^{(n)}$ and $P^{(n)}$, this paper provides the spectral characteristics of a q WDFHS. Through the calculation of the spectrum distribution, this paper shows that the spectrum of a q WDFHS with smaller interval is flatter and more concentrated on the domain of low frequencies, while those with larger intervals have more components of high frequency and sharper spectrum distribution.

Key words: wide interval frequency hopped pattern; Markov chain; stochastic test; spectral analysis

1 引言

宽间隔跳频地址码在实际应用中有诸多好处, 如增强抗窄带干扰的能力等^[1], 因而从它出现以来研究者颇多. 宽间隔跳频地址码的生成方法有许多种, 如去中间频带法^[2]、对偶频带法^[3]、构造法^[4-7]、平移替代法^[8]. 去中间频带法和对偶频带法是一种传统的宽间隔跳频方法, 其实现方法更多地属于频谱管理的范畴. 构造方法一般是应用有限域理论通过严格的数学推导而来的, 因而以算法实现为基础的. 构造法在宽间隔跳频地址码的实现上是主要的技术手段. 在构造法中, 还有一类称为非重复的跳频地址码产生方法, 其产生的码周期相对较短, 因而在实践中应用较少. 而平移替代法则是基于一类已经设计好的跳频地址码, 通过对其前后跳之间的跳频地址码施以运算而达到加大其间隔特性的目的. 后两种方法所得的宽间隔跳频地址码, 一般都是采用各种检测技术方法来对码序列的特性进行性能评估. 评估跳频地址码的主要目的就是考察它的随机特性是否良好, 如 χ^2 检验^[9,10]. 而对宽间

隔跳频地址码的评估还有一个附加的指标, 即地址码的宽间隔特性. 但是由于宽间隔跳频地址码在下一跳的地址码只是整个跳频频率集的一个子集, 又使人们对其抗截获性有一些担忧, 即其随机性损失到底如何分析, 损失又有多大. 本文在理论分析的基础上, 对人们所关心的第一个问题给出一些一般的结论, 以力图释解一些困惑. 如果将一般的跳频地址码序列看成一个平稳的随机过程, 就可以将宽间隔的跳频地址码序列和 Markov 过程相对应. 因此本文的第一部分首先对宽间隔跳频地址码序列建立了一个 Markov 过程模型.

为了研究宽间隔跳频地址码的概率分布和谱特性, 需要建立相应的模型, 下面从宽间隔跳频地址码发生器的 Markov 过程开始.

2 宽间隔跳频地址码发生器的 Markov 过程模型

2.1 跳频地址码间距离 D

对某族 q 元跳频地址码序列, 记相邻两跳的跳频地址码分别是 x 和 y , 则 $D = |x - y| \bmod q$. 严格地说, 标号为 q 的

码字和标号为 0 的码字之间的距离应是 q . 但为了后文讨论的方便, 对传统的定义作一个修改, 对实现并不影响. 可采用扩充跳频集的方法, 使其满足以上的定义.

212 跳频地址码序列间隔 d

某族跳频地址码序列的最小码间距离, 称为跳频地址码序列的间隔, 记为 d . 根据该定义可知, $0 \leq d < (q-1)/2$, d 为整数.

213 宽间隔跳频序列

对某族 q 元跳频地址码序列, 若其间隔 d 不小于 1, 则称其为宽间隔跳频序列. 此处的定义包含了非重复跳频地址码序列在内.

214 模型的建立

2141 模型的假设 有一个无限长的满足一维均匀特性的任意跳间均相互独立的 q 元跳频地址码序列, 称为基序列.

定理 1 对上述基序列, 经过特定算法得到的跳频地址码序列. 若其间隔为 d , 则此跳频地址码序列是一状态为 $0, 1, \dots, q-1$ 的 q 状态 Markov 点过程.

证明 记 p_{ij} 表示由当前跳的地址码编号为 i 向下一跳的地址码编号为 j 的转移概率. 由假设可知,

当 $|j-i| \bmod q \neq d$ 时

$$p_{ji} = p_j = \frac{1}{q-1} \quad (1)$$

而当 $|j-i| \bmod q = d$ (共有 $2d-1$ 个) 时 $p_{ji} = p_j = 0$

由式(1)可知, 此过程确是一个齐次的 Markov 链.

21412 宽间隔跳频地址码序列的转移矩阵 P 和转移流图

由式(1)所表示的转移概率组成的 q 阶方阵, 即是我们要求的转移概率矩阵. 如图 1 所示.

$$P = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{t} & \frac{1}{t} & \dots & \frac{1}{t} \\ \frac{1}{t} & 0 & \frac{1}{t} & \dots & \frac{1}{t} \\ \frac{1}{t} & \frac{1}{t} & 0 & \dots & \frac{1}{t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{t} & \frac{1}{t} & \frac{1}{t} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad \text{其中 } t = (q-2d+1)$$

图 1 q 元宽间隔跳频地址码序列($d=1$)的转移概率矩阵示意图

21413 转移概率矩阵 P 的性质 根据 Markov 链的理论, 可知下述性质成立:

性质 1 转移概率矩阵 P 是实对称矩阵, $P^{(n)}$ 也是实对称矩阵, 且有 $P = P^T$, $P^{(n)} = (P^{(n)})^T$;

性质 2 p_{ij} 的 n 步转移概率 $p_{ij}^{(n)}$ 即等于 $P^{(n)}$ 的第 i 行, 第 j 列的元素.

有了以上的模型和性质, 我们就可以求出 $p_{ij}^{(n)}$ 来, 从而知道对基序列施以某种运算以后, 到底使原来的地址码序列发生了怎么样的改变, 进而又给宽间隔跳频地址码序列的设计带来怎样的启示.

3 宽间隔跳频地址码序列的概率分布和谱

一般地说, 求出矩阵 $P^{(n)}$, 所有的问题都解决了. 由于 P 和 $P^{(n)}$ 的是实对称的, 又为其解析表达式的求出提供了方便.

但是这样的解析表达式十分地复杂, 所以我们在这里只能就一些极特殊的情形, 给出一个一般解. 而对于大多数的情况, 解析表达式是很难给出的.

311 间隔为 1($d=1$)时的 $P^{(n)}$ 的解析解

为了计算方便, 不妨重写一下 P 的元素, 即 $p_{ii} = 0$, $p_{ij} = 1/(q-1)$. 则首先有下述性质定理成立.

定理 2 对任意 $n \in \mathbb{N}$, $P^{(n)}$ 的元素只取两个值, 即对角线上元素的值都相等, 而非对角线元素也取同一值.

可以用数学归纳法来求证, 因该证明虽较简单, 但篇幅却不小, 在此略去. 这就是说, 只要求出两个值就可以了.

推论 $d=1$ 时, 对 $P^{(n)}$, 当对任意自然数, 均有:

$$p_{ii}^{(n)} = \frac{1}{q} + \frac{(-1)^n}{q(q-1)^{n-1}} \quad (2)$$

$$p_{ij}^{(n)} = \frac{1}{q} + \frac{(-1)^{n+1}}{q(q-1)^n} \quad (3)$$

证明 用数学归纳法. 当 $n=1$ 时, 式(2)和式(3)显然成立.

假定当 $n=k$ 时, 式(2)、(3)成立. 那么, 当 $n=k+1$ 时, 有

$$p_{ii}^{(k+1)} = (p_{ii}^{(k)})^2 + (q-1) \cdot (p_{ij}^{(k)} x_j)^2 = \frac{1}{q} + \frac{(-1)^{k+1}}{q(q-1)^{(k+1)-1}},$$

即对 $n=k+1$, 式(2)成立;

同理可证式(3)在 $n=k+1$ 时也成立. 由此可知, 式(2)、式(3)对所有自然数均成立. 证毕.

312 讨论

(1) 从式(2)、(3)中可以看出, 它们都含有两项, 前一项只和 q 有关, 是一个不随转移步长而变化的常数, 故称为稳态分布. 而后一项和两个数即 n 和 q 有关, 由于此项中是 n 的函数, 故称其为暂态分布. 稳态分布的求法, 我们既可以用式(2)、(3), 令 n 趋向于无穷求极限来得到. 也可以不用求出解析式, 而直接用式(1), 并根据 P 的对称特性, 求解稳态分布方程从而得出稳态分布来.

(2) 式(2)、(3)说明, 当 q 很大时, 只要很少几步, 就使 $P^{(n)}$ 和均匀分布相差很小, 如 $q=32$ 时, 二步转移概率矩阵 $P^{(2)}$ 和均匀分布的误差只有 $\frac{1}{q(q-1)} = \frac{1}{992}$ 和 $\frac{1}{q(q-1)^2} = \frac{1}{30752}$, 差别极其微小. 因此, 在实际中要得到一个良好特性的宽间隔跳频地址码, 即使在 $d=1$ 的情况下, 也是跳隙数越大越好; 同时需要的间隔越大, 则跳隙数也要越大.

313 $d>1$ 时 P 的稳态解

在求出 $P^{(n)}$ 的解析解之前, 先求出 P 的稳态解. 我们关心的问题是, 此稳态解是否存在. 要直接讨论稳态解依然不容易, 但是根据 Markov 链的性质^[12], 我们可以假定稳态解是存在的, 记其为 $P = (P_0 P_1, P_{q-1})^T$, 运用下式

$$P \# P = P \quad (4)$$

及归一化条件:

$$\sum_{i=0}^{q-1} P_i = 1 \quad (5)$$

如果式(4)、(5)联立的方程组无解, 则说明稳态解是不存在的; 如果有解, 求出其解来, 此解即是我们需要的稳态分布.

这是一个 q 元一次方程组, 若有解, 则求出其解来并不困难. 根据一步转移矩阵 P 和其性质 1, 因其特殊的对称性 $P = P^T$, 知道各个稳态解在式(4)、式(5)组成的方程组中完全可以相互替换, 因而它们都相等, 即方程组(4)、(5)的解是

$$P_0 = P_1 = \dots = P_{q-1} = 1/q \quad (6)$$

至此, 我们知道, 对 $d > 1$, P 的稳态分布是各行均相同且等于 $1/q$ 的均匀分布.

3.1.4 $d > 1$ 时 $P^{(n)}$ 的解

由于 P 是一个实对称的方阵, 一定存在一个正交的方阵 C , 使得 $C^{-1}PC = \Lambda$, Λ 是 P 的特征值构成的对角阵, 从而有

$$P^{(n)} = C \Lambda^n C^{-1} \quad (7)$$

由此就可以写出任意 n 步转移概率.

对于 $P^{(n)}$, 其各元素可由式(7)直接写出. 这样一个表达式, 要是在这儿列出来, 将占去很大的篇幅. 所以这里只能给出两个简单的例子来说明.

例 1 $q = 8, d = 2$ 时, 特征向量为: $[-\frac{1}{3} + \frac{1}{3}\sqrt{2}, -\frac{1}{3} + \frac{1}{3}\sqrt{2}, -\frac{1}{3} - \frac{1}{3}\sqrt{2}, -\frac{1}{3} - \frac{1}{3}\sqrt{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, 1]$.

其相应的正交矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ -\sqrt{2} & -1 & -1 & \sqrt{2} & 1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & \sqrt{2} & -\sqrt{2} & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & 1 & 1 & -\sqrt{2} & 1 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & -\sqrt{2} & \sqrt{2} & -1 & -1 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

而正交矩阵的逆为:

$$\begin{bmatrix} -\sqrt{2}/8 & 1/4 & -\sqrt{2}/8 & 0 & -\sqrt{2}/8 & 1/4 & \sqrt{2}/8 & 0 \\ 1/4 & -\sqrt{2}/8 & 0 & \sqrt{2}/8 & -1/4 & \sqrt{2}/8 & 0 & -\sqrt{2}/8 \\ 1/4 & \sqrt{2}/8 & 0 & -\sqrt{2}/8 & -1/4 & -\sqrt{2}/8 & 0 & \sqrt{2}/8 \\ \sqrt{2}/8 & 1/4 & \sqrt{2}/8 & 0 & -\sqrt{2}/8 & -1/4 & \sqrt{2}/8 & 0 \\ 1/8 & -1/8 & 1/8 & -1/8 & 1/8 & -1/8 & 1/8 & -1/8 \\ 1/4 & 0 & -1/4 & 0 & 1/4 & 0 & -1/4 & 0 \\ 0 & 1/4 & 0 & -1/4 & 0 & 1/4 & 0 & -1/4 \\ 1/8 & 1/8 & 1/8 & 1/8 & 1/8 & 1/8 & 1/8 & 1/8 \end{bmatrix}$$

例 2 当 $q = 32, d = 1$ 时, 特征向量为:

$$\begin{aligned} & [-\frac{1}{29} - \frac{1}{29}\sqrt{2+\sqrt{2}}, -\frac{1}{29} - \frac{1}{29}\sqrt{2+\sqrt{2}}, -\frac{1}{29} + \frac{1}{29}\sqrt{2+\sqrt{2}}, \\ & -\frac{1}{29} + \frac{1}{29}\sqrt{2+\sqrt{2}}, -\frac{1}{29} - \frac{1}{29}\sqrt{2-\sqrt{2}}, -\frac{1}{29} - \frac{1}{29}\sqrt{2-\sqrt{2}}, \\ & -\frac{1}{29} + \frac{1}{29}\sqrt{2-\sqrt{2}}, -\frac{1}{29} + \frac{1}{29}\sqrt{2-\sqrt{2}}, \\ & -\frac{1}{29} - \frac{1}{29}\sqrt{2-\sqrt{2+\sqrt{2}}}, -\frac{1}{29} - \frac{1}{29}\sqrt{2-\sqrt{2+\sqrt{2}}}, \\ & -\frac{1}{29} + \frac{1}{29}\sqrt{2-\sqrt{2+\sqrt{2}}}, -\frac{1}{29} + \frac{1}{29}\sqrt{2-\sqrt{2+\sqrt{2}}}, \\ & -\frac{1}{29} - \frac{1}{29}\sqrt{2+\sqrt{2+\sqrt{2}}}, -\frac{1}{29} - \frac{1}{29}\sqrt{2+\sqrt{2+\sqrt{2}}}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{29} + \frac{1}{29}\sqrt{2+\sqrt{2+\sqrt{2}}}, -\frac{1}{29} + \frac{1}{29}\sqrt{2+\sqrt{2+\sqrt{2}}}, \\ & -\frac{1}{29} - \frac{1}{29}\sqrt{2-\sqrt{2+\sqrt{2}}}, -\frac{1}{29} - \frac{1}{29}\sqrt{2-\sqrt{2+\sqrt{2}}}, \\ & -\frac{1}{29} + \frac{1}{29}\sqrt{2-\sqrt{2+\sqrt{2}}}, -\frac{1}{29} + \frac{1}{29}\sqrt{2-\sqrt{2+\sqrt{2}}}, \\ & -\frac{1}{29} - \frac{1}{29}\sqrt{2+\sqrt{2-\sqrt{2}}}, -\frac{1}{29} - \frac{1}{29}\sqrt{2+\sqrt{2-\sqrt{2}}}, \\ & -\frac{1}{29} + \frac{1}{29}\sqrt{2+\sqrt{2-\sqrt{2}}}, -\frac{1}{29} + \frac{1}{29}\sqrt{2+\sqrt{2-\sqrt{2}}}, \\ & 1, \frac{1}{29}, \frac{1}{29}, -\frac{1}{29} + \frac{1}{29}\sqrt{2}, -\frac{1}{29} + \frac{1}{29}\sqrt{2}, -\frac{1}{29} - \frac{1}{29}\sqrt{2}, \\ & -\frac{1}{29} - \frac{1}{29}\sqrt{2}, \frac{1}{29} \end{aligned}$$

它所对应的正交矩阵及其逆十分复杂, 在此就不列出了.

有了 $P^{(n)}$, 就可以求出 q 元宽间隔跳频地址码序列的自相关函数, 从而给出谱函数来.

3.1.5 q 元间隔为 d 的宽间隔跳频地址码序列的谱

3.1.5.1 定义 1 设有一 q 元跳频地址码序列 $\text{Seq} = \{I_n, I_n \text{ 取 } 0, 1, \dots, q-1; n \in \mathbb{Z}\}$, 其自相关函数为^[11]:

$$\phi_{ii}(m) = \frac{1}{2} E[I_{n+m} I_n], \quad m \in \mathbb{Z} \quad (8)$$

根据定义 1 知道, Seq 是一双向无穷的序列, 故在计算序列的自相关函数的时候, 可以认为序列已经处于平稳状态. 根据式(7)从 I_{n+m} 到 I_n 的转移是关于相位差 $m = 0$ 对称的, 因此前进方程和后退方程是一致的, 这样只要计算 $m \in \mathbb{Z}^+$ (包括 0) 即可.

令 n 时刻 I_n 和 I_{n+m} 分别取状态 i 和 j , 因此, 当 $m \neq 0$ 时, 有

$$\begin{aligned} E[I_{n+m} I_n] &= \sum_{i=0}^{q-1} \sum_{j=0}^{q-1} i j \Pr(i, j) = \sum_{i=0}^{q-1} \sum_{j=0}^{q-1} i j \Pr(i, j) \\ &= \sum_{i=0}^{q-1} \sum_{j=0}^{q-1} \frac{1}{q} i j \Pr(i, j) \end{aligned} \quad (9)$$

而当 $m = 0$ 时, 当 $i = j$ 时, $\Pr(i, i) = \Pr(i, i) = \Pr(i, i) = \Pr(i, i) = 1$, 当 $i \neq j$ 时, $\Pr(i, j) = 0$, 因此有

$$E[I_{n+m} I_n] = E[I_n^2] = \sum_{i=0}^{q-1} \frac{1}{q} i^2 \quad (10)$$

由此可得,

$$\phi_{ii}(m) = \begin{cases} \frac{1}{2q} \sum_{i=0}^{q-1} i^2, & m = 0 \\ \frac{1}{2q} \sum_{i=0}^{q-1} \sum_{j=0}^{q-1} i j \Pr(i, j), & m \neq 0, m \in \mathbb{Z} \end{cases} \quad (11)$$

由于序列 Seq 的元素不含负数, 所以其自相关函数中必然收敛于一个非零的正数, 记为 x , 则 $x = 1/2 [E(I_n)]^2$. 为了去掉谱分析结果中的 0 频处的大的冲激, 故将自相关函数中的 x 减去, 这样更易看出谱特征. 将修正后的自相关函数和定义 1 中的采用同一记号, 则有:

$$\phi_{ii}(m) = \begin{cases} \frac{1}{2q} \sum_{i=0}^{q-1} i^2 - x, & m = 0 \\ \frac{1}{2q} \sum_{i=0}^{q-1} \sum_{j=0}^{q-1} i j \Pr(i, j) - x, & m \neq 0, m \in \mathbb{Z} \end{cases} \quad (12)$$

根据式(12)计算得 $q = 32, d = 3$ 时自相关函数的前 12 个

值为[42. 625, 2. 065, - 0. 510, 0. 128, - 0. 033, 0. 008, - 0. 002, 0. 001, - 0. 001, 0. 000, 0. 000, 0. 000, 0. 000, 0. 000].

3.5.2 定义 2 q 元跳频序列 Seq 的 N 步谱 $S_N(k)$ 如下式所示:

$$S_N(k) = \frac{1}{N} \left| \sum_{m=0}^{N-1} \leq_i(m) e^{-j \frac{2\pi m k}{N}} \right|, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (13)$$

此即自相关函数的 N 点离散傅里叶变换(DFT).

根据式(13)可以求出 $S_N(k)$ 的理论值来, 从而对 Seq 进行分析. 图 2 为 $q=32$ 时, 由式(13)计算出的谱的理论值. 对 N 步谱 $S_N(k)$ 而言, 在 $k > 3N/4$ 或 $k < N/4$ 时, 为低频成分; 而在 $N/4 < k < 3N/4$ 时, 为高频成分. 这一点也和一般意义上的傅立叶谱是一致的. 图 2 为一个 32 元宽间隔跳频地址码序列的 32 步谱的曲线, 图中的横坐标为式(13)中的 k .

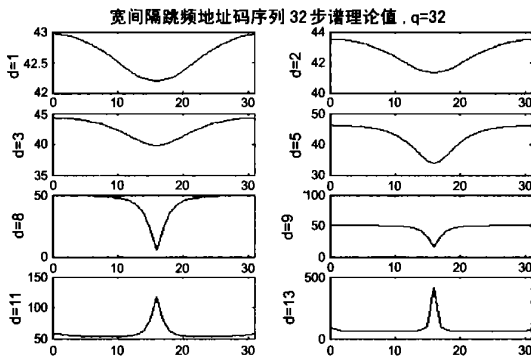


图 2 一个 $q=32$ 的宽间隔跳频地址码序列谱的例子

3.5.3 讨论 由图 2 可以看出以下的特性: (1) 从谱的平坦程度上看, 间隔越小, 谱就越平坦; 当间隔很大时, 谱的平坦性就很差. 实际上, 谱的平坦程度反映了前后跳之间的依存性. 谱越平坦, 说明自相关函数的形状就越近似于冲激脉冲; (2) 从谱的成份上看, 间隔小时, 谱就越集中于低频部分; 当间隔大时, 谱就越集中于高频成分. 谱的成份, 也反映了序列的变化特性.

4 结论及讨论

把宽间隔跳频地址码序列和一个 Markov 过程对应起来, 并由此进行了转移概率矩阵的推导, 最后给出了相应的谱分析的结果. 我们这样做的目的就在于找到宽间隔跳频地址码序列的规律. 从前文, 我们可以得出, 从谱结构的分析上看, 宽间隔的跳频地址码序列相比于具有几乎平坦谱的一般跳频地址码序列来说, 是有性能损失的. 如何衡量损失程度, 这里不作讨论.

其次, 在本文的开始部分, 我们给出的概率转移矩阵是实对称的, 因此所有的计算都是以此为基础的. 在非对称的概率转移矩阵的情况下其理论分析将更为复杂.

在这儿还有一点要说明, 本文的基础是假设有一个一般的跳频地址码序列, 它从局外观察者角度来看性能是理想的, 这一点是能够做到的. 实际上, 已经有很多关于一般跳频地址码序列的研究, 这也使本文的分析建立在一个比较合理的基础上, 而不至于流于空谈.

参考文献:

- [1] 梅文华, 杨义先. 跳频通信地址编码理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [2] 陈文德. 宽间隔的跳频图样[J]. 系统科学与数学, 1983, 2(4): 295~303.
- [3] 洪福明, 张世平. 宽间隔跳频图样的探讨[J]. 成都电讯工程学院学报, 1985, 14(增刊 2): 6~12.
- [4] 李斌, 赖仪一. 一种宽间隔码序列的研究[J]. 通信工程学院学报, 1988, 2(2): 84~89.
- [5] 李斌. 战术跳频电台码序列的研究[D]. 南京: 通信工程学院, 1988.
- [6] 梅文华. 宽间隔的非重复跳频序列族[J]. 通信学报, 1994, 15(6): 63~68.
- [7] Shaar A A, Davis P A. A survey of one2coincidence sequences for fire2quencyhopped spread2spectrum systems[J]. IEE Proceedings (Part F), 1984, 131(7): 719~724.
- [8] 何维苗, 李剑澄, 叶永涛. 一种新的实现宽间隔跳频的方法))) 随机平移替代法[A]. 99 军事通信抗干扰研讨会论文集[C]. 南京: 南京航空航天大学出版社, 1999.
- [9] 张申如, 王庭昌, 邓晓燕. 跳频码序列的统计检测[A]. 97 军事通信抗干扰研讨会论文集[C]. 南京: 南京航空航天大学出版社, 1997.
- [10] 何维苗, 张申如, 王庭昌. 宽间隔跳频码序列的性能检验[A]. 99 军事通信抗干扰研讨会论文集[C]. 南京: 南京航空航天大学出版社, 1999.
- [11] John G Proakis. Digital Communications(3rd) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998.
- [12] 陆大. 随机过程及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.

作者简介:



关胜勇 男, 1967 年 9 月生于安徽省肥东县, 分别于 1990 年、1994 年获得学士和硕士学位, 现为南京电讯技术研究所工程师, 在职博士生, 目前主要的研究兴趣为纠错编码、信号抗干扰处理、扩频通信等, 已经发表学术论文数篇.

姚富强 (见本期 969 页)