

# 提高跳频同步可靠性的改进方法

黄显彬，刘传勇，蒋鹏，刘洋，唐文华，翟露

(北方信息控制集团有限公司 南京 211153)

**摘要：**跳频同步是跳频通信系统的关键技术之一，同步可靠性是衡量跳频系统的关键技术指标。文章提出了两种提高跳频同步可靠性的改进方法，并对同步性能进行了分析，结果表明，改进后同步捕获概率高，虚警低，同步可靠性得到提升。

**关键词：**跳频同步，阻塞干扰，同步频率，TOD 搜索，捕获概率

## 0 引言

跳频通信系统的抗干扰和抗截获能力强，在现代军事通信中应用广泛。跳频同步时跳频通信的关键技术，只有实现了跳频同步，才能保证跳频通信系统能进行正常通信。

在现代化战争中，战场的电磁环境复杂，敌方的干扰手段多样。设备容易受到外部环境的干扰，导致某些频率不能正常通信，影响跳频系统的同步性能。提高跳频同步的可靠性和抗干扰性成为了跳频系统尤为关键的课题。本文对综合跳频同步方法进行改进，进一步提高跳频同步的可靠性和抗干扰性。

## 1 跳频同步原理

跳频同步就是要实现收发双方跳频图案的同步，使收发双方的频率按一致的步调整，保持频率一致。实现跳频同步的方法有多种：基于精确时钟同步法、同步字头法、自同步法等，一种基于这几种的方法的综合跳频同步法具有同步时间快、同步可靠性高、同步随机性好等优点。

### 1.1 跳频图案产生

跳频图案是跳频通信系统的保密的核心，为了提高跳频通信系统的抗干扰性和保密性，跳频图案的产生不只是简单的由伪随机码控制，而是用密钥数据 PK 和跳频时间信息 TOD 作为伪随机码发生器的初始化数据，经过 64 位移位寄存器产生伪随机码，再经过非线性运算后，得到跳频图案，见图 1。

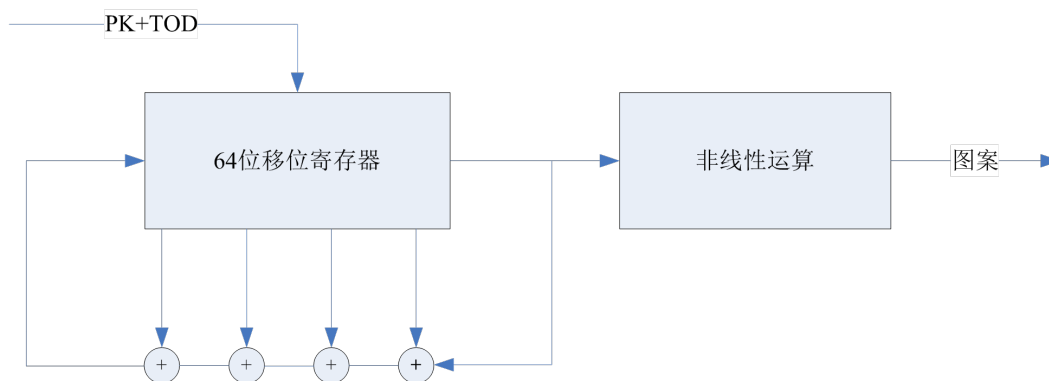


图 1 跳频图案产生框图

收发双方的密钥数据、伪随机码产生方法都是一样的，只有时间信息 TOD 不一致，要是收发双方实现跳频同步，实际就是收方的时间信息 TOD 与发方的时间信息 TOD 保持一致。

### 1.2 同步信息发送

一般在超短波电台中，同步信息分为 5 组传输，分别为 TOD1, TOD2, TOD3, TOD4, TOD5。每组 TOD 信息由多个频率发送，同步频率随着时间的变化而更新。

为了保证同步信息的可靠传输，同时也为了提高同步信息的检测概率，不是简单的传送同步信息，而是

要采用不同的相关编码对同步信息进行编码。通常用多位长度的相关码来表示 1 位信息，正码表示“1”，负码表示“0”。

### 1.3 同步信息的接收

同步信息的接收分为两步，即捕获和跟踪解码。捕获就是完成对 TOD 信息相关码的捕获，跟踪解码就是完成对捕获到的相关峰进行解析，得到 TOD 信息。

接收端用本地的 TOD 信息产生若干个初始同步频率（本文以 7 个为例）对发端的同步频率进行扫描，扫描的方式有快扫描和慢扫描，一般采用慢扫描方式，不会增加频率合成器的难度。

搜索的格式分成两种，一种为未入网的搜索方式，只需要搜索  $f_s$ ，其格式安排如下：每次同步频率变换后，按顺序  $fs1, fs2, fs3, fs4, fs5, fs6, fs7$  循环重复。如果收发频率对上，通过 TOD1 的数字相关器能解出相关峰，从而解析出 TOD1 的数据，根据接收到的 TOD1 数据可以判断此时的频率和推出 TOD2 的频率，开始搜索 TOD2，依次类推，直到收完 TOD5，完成跳频同步，退出搜索，见图 2。

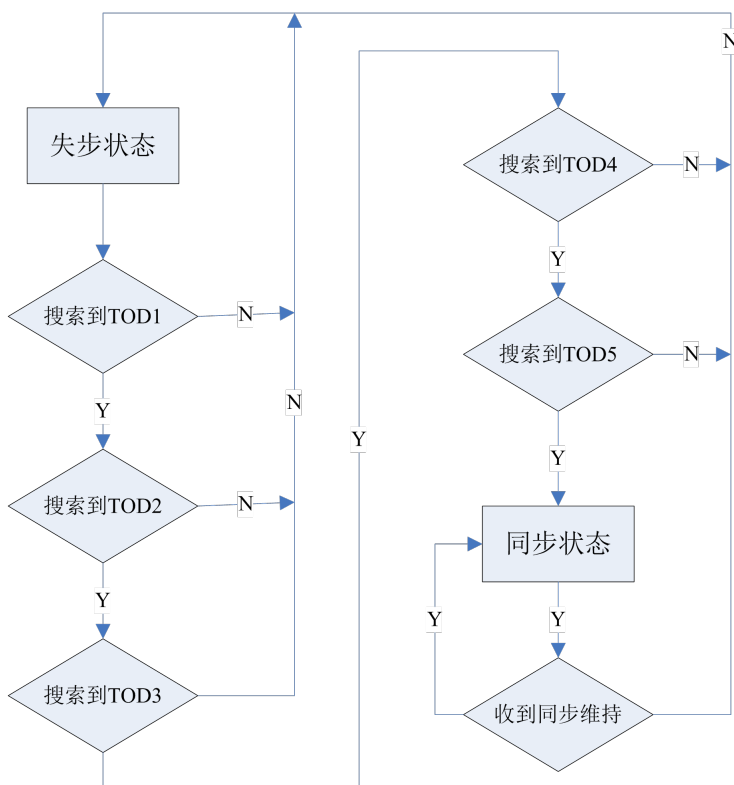


图 2 TOD 搜索过程

另一种为已入网的搜索方式，只需要搜索  $f_G$  来维持同步。搜索  $f_{G1}$  时，如果勤务同步的数字相关器检测有相关峰，再检测下一个  $f_{G2}$  的相关峰，不论此时有没有正确的检测相关峰，都从下一帧开始重新搜索  $f_{G1}$ 。

## 2 对跳频同步的改进

跳频同步要求在低信噪比情况下也能保证可靠同步，并且具有很强的抗干扰能力。为了提高可靠性和抗干扰能力，可以从提高同步信息传输过程的容错性和同步频率选择策略两方面着手。

### 2.1 同步信息格式改进

#### 2.1.1 一般设计

为了保证同步信息的可靠传输，提高同步信息的检测概率，对同步信息进行相关编码后再发送。一般采用多位长度的相关码来表示 1 位信息，1 位同步信息用 16 位相关码来表示。格式见图 3。

4×16位相关码

图3 改进前同步信息格式

TOD1~TOD5 所采用的相关码是不同的。16 位的相关码太短，抗扰性不强，容错能力差，容易产生误相关峰，导致解码错误。

### 2.2.2 改进设计

提高相关码的位数可以提高检测概率，提高捕获性能。但相应的占用的带宽增加，权衡带宽和捕获性能，本文选择 64 位相关码为例。64 位相关码代表 4 位同步信息，这样在不增加带宽的情况下，相同门限码长比情况下，提高了相关码检测概率，增强相关码间的抗互扰性。

TOD1~TOD5 分别传输 4 位同步信息，4 位同步信息用 64 位相关码来表示。格式见图 4。

1组（4位）×64位相关码

图4 改进后同步信息格式

4 位同步信息共有 16 种状态，需要 16 组 64 位相关码，如果采用正负相关码，则只需要 8 组 64 位相关码。

对 64 位相关码的寻找非常关键，要求自相关性强，互相关弱，才能保证 TOD 信息的抗扰性并且两两间互不干扰。通过计算机编程寻码，仿真，找到需要的 64 位自相关强，互相关弱的相关码。

## 2.2 同步频率选择策略改进

### 2.2.1 一般设计

密钥数据 PK 和跳频时间信息 TOD 作为伪随机码发生器的初始化数据，经过 64 位移位寄存器产生伪随机码，再经过非线性运算后，得到跳频图案，见图 1。

### 2.2.2 改进设计

当设备受到部分频段的阻塞干扰时，受到干扰的频率不能正常通信，如果同步频率在这些受到干扰的频率上时，接收端不能正确接收同步信息，不能完成同步。如果同步频率选择策略比较优化，所选用的同步频率只有极少几个落在干扰频带内（视干扰带宽而定），能很好的完成同步。

在原设计的基础上，增加了宽间隔处理后，再输出跳频图案，其思想是使同步频率的间隔加大，让同步频率落在干扰频率范围内的几率减小，从而提高同步概率。

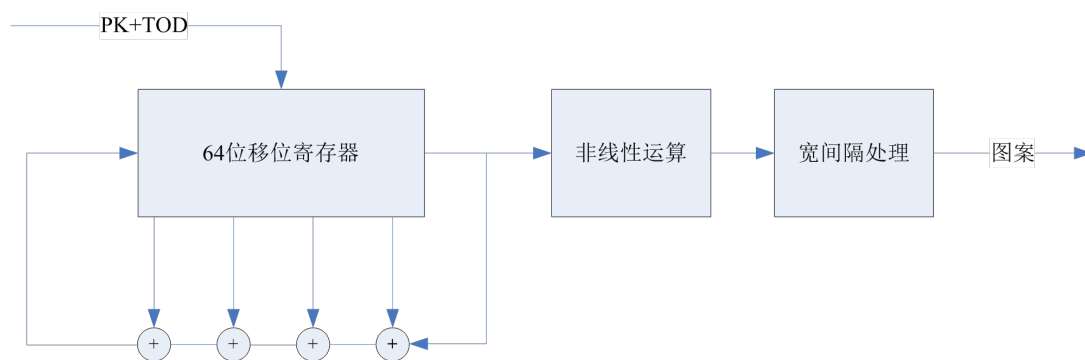


图5 改进跳频图案产生框图

## 3 跳频同步性能分析

### 3.1 同步头捕获性能分析

### 3.1.1 相关码检测概率

解调后基带信号误码率  $P_b$ ，相关码长度  $L$ ，检测门限  $G$ ，则相关码正确检测概率  $P_D$  和错误检测概率  $P_F$  (虚警概率) 分别为：

$$P_D = \sum_{L} C_L^i (1 - P_b)^i P_b^{L-i}$$

$$P_F = \sum_{L} C_L^i (1 - P_b)^{L-i} P_b^i$$

式中  $C_L^i$  为二项式系数。

下图显示了相关码长度分别为 16 和 64 时，检测门限  $G$ 、误码率  $P_b$  和检测概率  $P_D$  的关系。

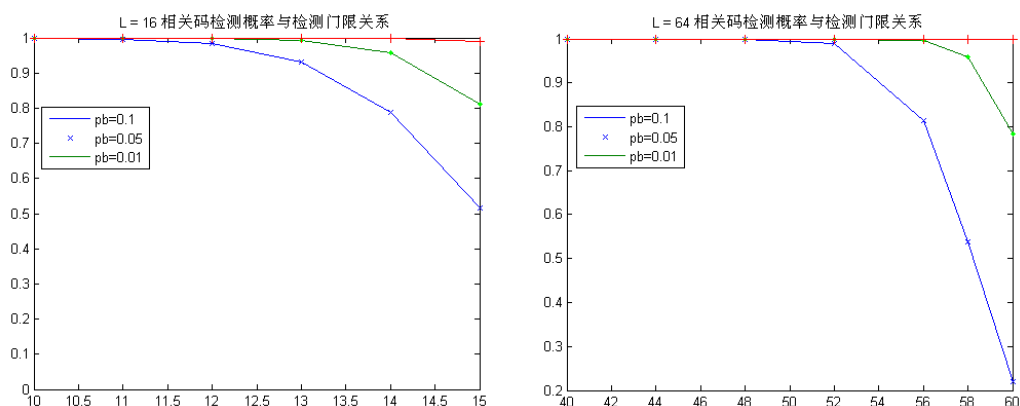


图 6 相关码长度为 16 和 64 时检测概率与检测门限关系

### 3.1.2 同步头捕获概率

捕获的标志就是捕获到所有的相关码，因此同步头捕获概率  $P_A$  和虚警概率  $P_R$  分别为：

$$P_A = P_D^K$$

$$P_R = P_F^K$$

下图显示了相关码长度分别为 16 和 64 时， $K=5$  时，检测门限  $G$ 、误码率  $P_b$  和检测概率  $P_A$  的关系。

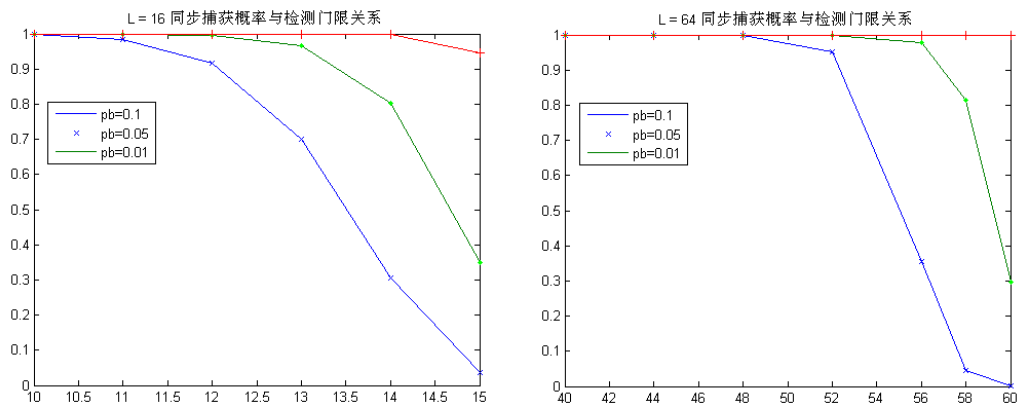


图 7 相关码长度为 16 和 64 时同步捕获概率与检测门限关系

## 3.2 抗阻塞干扰同步性能分析

频点阻塞概率为  $P_Z$ ，TOD 使用的频点数目为  $m$ 。则 TOD 同步概率  $P_n$  为：

$$P_n = (1 - P_Z^m) \times P_A$$

跳频同步概率  $P_H$  为: 
$$P_H = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_N$$

式中  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_n$  分别为 TOD1, TOD2, TODn 的同步概率。

TOD1~TOD5 均使用 7 个同步频率。改进前跳频单次同步概率见表 5。

表 5 改进前跳频同步概率

各相关码 同步概率	30%频点阻塞	50%频点阻塞	70%频点阻塞
TOD1	0.99910	0.9915128	0.9170217
TOD2	0.99910	0.9915128	0.9170217
TOD3	0.99910	0.9915128	0.9170217
TOD4	0.99910	0.9915128	0.9170217
TOD5	0.99910	0.9915128	0.9170217
同步概率	0.995515	0.9582783	0.6484822

在改进后的设计中, 每次同步仍然使用 7 个同步频率。但是采用宽间隔方法, 使 7 个同步频率间隔拉大, 被干扰概率降低。同步概率和跳频表中频率点数有关系, 下面的表显示出频率表中频率个数不同情况下的同步概率。

表 6 改进后 32 个频率点时跳频同步概率

各相关码 同步概率	30%频点阻塞	50%频点阻塞	70%频点阻塞
TOD1	0.99910	0.9915128	0.9170217
TOD2	0.99910	0.9915128	0.9170217
TOD3	0.99910	0.9915128	0.9170217
TOD4	0.99910	0.9915128	0.9170217
TOD5	0.99910	0.9915128	0.9170217
同步概率	0.995515	0.9582783	0.6484822

表 7 改进后 64 个频率点时跳频同步概率

各相关码 同步概率	30%频点阻塞	50%频点阻塞	70%频点阻塞
--------------	---------	---------	---------

TOD1	0.999320	0.999320	0.993724
TOD2	0.999320	0.999320	0.993724
TOD3	0.999320	0.999320	0.993724
TOD4	0.999320	0.999320	0.993724
TOD5	0.999320	0.999320	0.993724
同步概率	0.996605	0.996605	0.969010

虽然每个频表有 256 个频率序号，但实际频率点个数可能没有 256 个。从表 6、表 7 中可以看出，当频率表中只有 32 个频率点时，单次同步概率与改进前一致，随着跳频表中频率数的增加，改进后的跳频单次同步概率得到提高，当有 256 个频率点时，抗阻塞干扰的同步概率会得到很大的提高。

## 4 结论

本文提出的改进传输同步相关码和宽间隔同步频率选择两种改进方法，能有效的提高同步检测概率，降低虚警概率，提高同步概率。经过在超短波设备中的实际验证测试，有效的提高了跳频同步的可靠性，能极好的对抗部分频带阻塞干扰。

### 参考文献：

- [1].郭梯云, 杨家玮, 李建东. 数字移动通信[M]. 北京: 人民邮电出版社. 2001.
- [2].姚富强. 通信抗干扰工程与实践(第2版)[M]. 北京: 电子工业出版社. 2012.
- [3].梅文化, 王淑波, 邱永红, 等. 跳频通信[M]. 北京: 国防工业出版社. 2005.
- [4].蒋定顺, 金立军. 高速跳频通信系统同步技术研究[J]. 成都: 电子科技大学学报. 2005, 2.
- [5].尹建方, 王红霞, 别玉霞, 等. 高速跳频通信系统同步技术与防治[J]. 太原: 火力与指挥控制. 2008,8.