

基于 MATLAB 的跳频同步仿真研究

倪琳娜 赵振岩 于海峰

(北京空间飞行器总体设计部, 北京, 100094)

摘要: 跳频同步是跳频通信系统的关键技术及核心。本文对传统的并行搜索跳频捕获法进行简化, 采用等待搜索自同步的方案。介绍了等待搜索自同步法的基本原理、虚警漏警控制策略, 给出了捕获时间的计算公式。利用 MATLAB 的可视化工具箱 Simulink 建立了跳频通信系统的仿真模型。仿真结果表明, 在 AWGN 信道中, 等待搜索自同步法可实现快速捕获, 性能优于并行搜索捕获法。

关键词: 跳频通信系统; 跳频同步; 等待搜索自同步

中图分类号: TN914.41

Simulation Research on Synchronization for Frequency Hopping System Based on MATLAB

Ni Lin-na Zhao Zhen-yan Yu Hai-feng

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing, 100094)

Abstract: Frequency hopping synchronization is the key technology and core of frequency-hopping communication system. Waiting search self-synchronization scheme, the simplified mode of the conventional parallel search acquisition scheme, is adopted in this paper. The basic principle of waiting search self-synchronization, the control strategy of false alarm and miss alarm, the formula of acquisition time are introduced in this paper. This simulation mode of frequency-hopping communication system is built by using Simulink, provided by MATLAB. The result showed that the waiting search self-synchronization can achieve the fast acquisition in AWGN channel, and the acquisition time is shorter than parallel search acquisition scheme.

Key words: Frequency-hopping Communication System; Frequency Hopping Synchronization; Waiting Search Self-synchronization

1 引言

卫星通信系统测试需要各种扩频、跳频体制的信号源, 且信号源需具备自检功能。针对扩频信号源设计的需求, 本文主要对跳频通信系统进行研究, 重点研究了跳频同步的实现方案。在传统的跳频同步自同步法的基础上, 采取了等待搜索自同步方法, 给出了其在虚警、漏警下的控制策略。本文旨在通过 MATLAB 可视化工具箱 simulink 建立跳频通信系统仿真模型, 实现等待搜

索自同步法在跳频通信系统中的应用, 为跳频信号源自检程序的设计提供参考。

2 跳频同步

跳频通信系统正确接收的前提是本地跳频载波与发端跳频载波跳变规律完全一致, 包括频率一致和相位一致^[1,2]。跳频同步是跳频通信系统的关键技术及核心。跳频同步包括两个过程: 跳频捕获和跳频跟踪。跳频捕获, 是跳频通信首要的同时也是最困难的工作。它的任务是搜索收到的跳频信号的跳频码序列的相位, 同时调整接收机本地产生的跳频码序列的相位, 直到两者的相位差小于一跳时间。跳频跟踪对本地和接收跳频码序列的剩余相位差进行精确校准, 直到几乎完全重合。同步

作者简介: 倪琳娜 (1985-), 女, 陕西省榆林市, 北京空间飞行器总体设计部在读研究生, 飞行器设计专业; 赵振岩 (1963-), 男, 辽宁省大连市, 研究员, 多年从事卫星控制系统技术总体设计和系统测试工作, 目前的研究方向是卫星控制系统测试技术、卫星综合测试技术; 于海峰 (1978-), 男, 黑龙江省哈尔滨市, 高级工程师, 目前主要从事卫星有效载荷系统级测试工作。

跟踪进程还起到同步保持的作用,以避免收发双方由于时间误差的积累而导致同步失去。跳频同步过程中需要有同步识别进程,用以监测接收机的同步状态,一方面保证在同步捕获成功后,及时地进入同步跟踪进程;另一方面,在同步跟踪进程中,一旦识别出同步误差已经超出同步跟踪环路的校正范围,即已经失去了同步,则

指示接收机转入同步捕获进程,重新进行同步捕获^[3,4]。

本文采用等待搜索自同步法。其捕获方案是对并行搜索捕获法的一种简化,即只采用了并行搜索捕获法的一个支路进行捕获与否的判决。文中第3部分对等待搜索自同步法详细介绍。

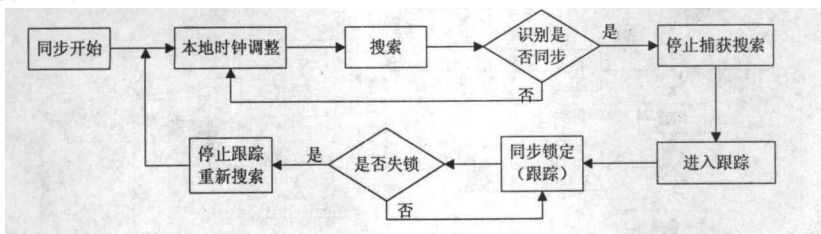


图1 跳频同步过程

3 等待搜索自同步法

3.1 等待搜索自同步原理及仿真模型

3.1.1 等待搜索捕获

等待搜索自同步法的捕获原理:本地频率合成器产生的跳频信号与接收跳频信号进行相关(混频),相关后的信号经过中频滤波后,再由平方器和积分器构成的能量检测器进行能量检测后加到比较器与预先给定的门限 V_T 相比较。等待搜索自同步法的本地码在同步捕获之前没有跳频动作,而是静止在某一个频率 f_i 上。同步开始时,首先使接收机跳频序列发生器置于某一状态,

此时所产生的本地信号频率就静止等待在相应的频率点上。然后扫描接收跳频信号,若相关检测器输出值大于门限电平,则判定为初始捕获完成,释放一个时钟脉冲,触发本地跳频序列发生器,本地载波频率开始按照跳频图案跳变。为防止噪声或干扰造成的虚警,一次相关值超过门限 V_T ,并不认为捕获成功。而是需要连续 M_1 次相关值大于捕获门限才认为捕获成功。如图2所示,若计数器输出大于 M_1 ,则同步锁定。若相关检测器输出未超过能量门限电平,则本地跳频序列发生器保持在原来状态。

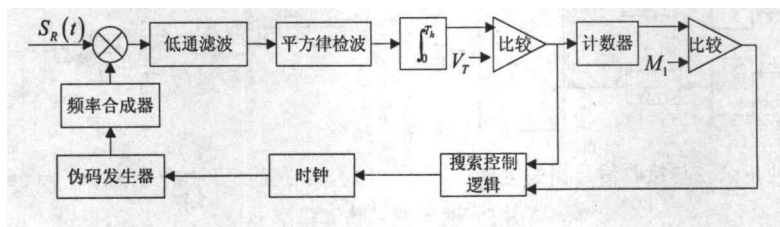


图2 等待搜索自同步法

跳频捕获中,为避免本地和接收信号载波频率相差为 $\pi/2$ 时,混频器输出结果为0,不能正确进行捕获判断,因此本地跳频信号的正余弦分量同时与接收跳频信号相

关运算,经低通滤波器、平方器和积分器构成相关检测量。其Simulink仿真模型如图3所示,仿真结果如图10所示。

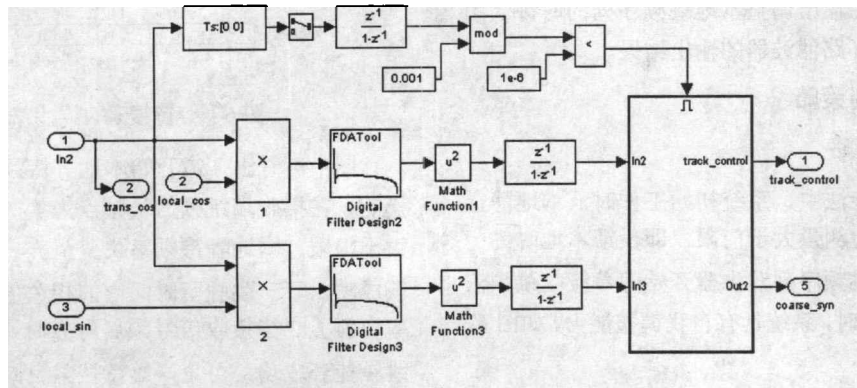


图3 相关检测量仿真模型

3.1.2 跳频跟踪

跳频信号捕获成功后,启动跳频跟踪电路,以进一步减小本地和接收跳频码序列的相位差,直到二者相位几乎保持一致^[5,6]。本文跳频同步误差信号的提取,是利用一个跳频驻留时间内,前半跳时间中信号能量与后半跳时间中信号能量相比较,给出跳频超前或滞后信息。

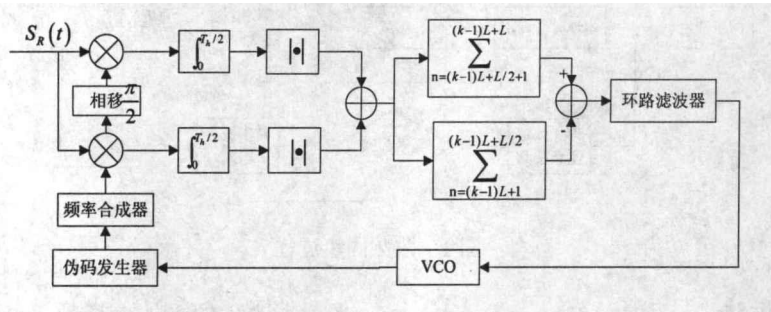
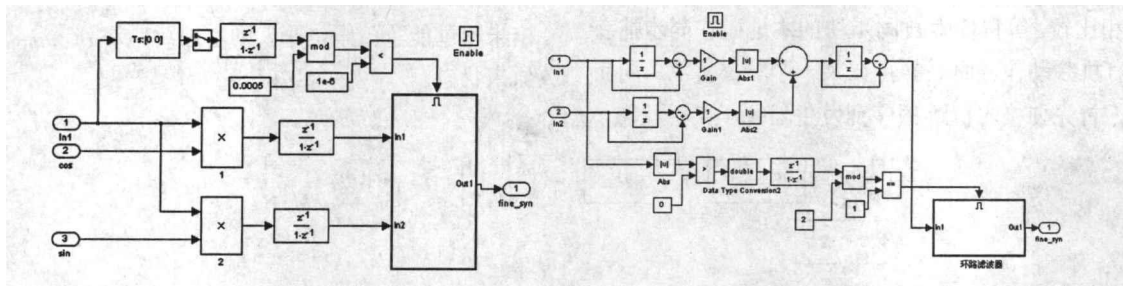


图4 跳时差提取

这里本地跳频载波正余弦形式同时参与相关运算,这是为避免当接收信号和本地信号相位差为 $\pi/2$ 时,本地跳频解调后的输出结果为零,不能利用环路滤波器进行本地跳频码相位的精确调整。上图中的积分器起到了低通滤波的作用,通过积分累加,高频分量被滤掉,低

频信号每隔半个码片时间进行一次累加积分,最后用前半码元与后半码元的能量差送至环路滤波器,经压控振荡器来调整本地跳频码相位。其中, L 为一跳驻留时间内仿真采样值的个数。跳频跟踪 Simulink 仿真模型如图 5。



(a)本地正余弦与接收信号相关运算

(b)本地与接收信号相关值前后半码元能量差

图5 跳频跟踪仿真模型

图 5-(a) 可看出,跳频跟踪环路中,每隔半个码片(仿真时跳频驻留时间为 0.001s,半个码片为 0.0005s,如图示)对本地、接收相关值进行一次累加。5-(b) 中将一个码片的后半码元和前半码元的能量差值送入环路滤波器,由环路滤波器的输出调整本地跳频序列的时钟。图 11 给出了跳频跟踪环路滤波器的输出结果。

3.2 虚警漏警控制策略

3.2.1 虚警控制策略

等待搜索自同步法中,系统初始工作时,本地静止在频点 f_1 上,一旦检测量大于门限,即反馈本地时钟一个信号,启动本地跳频序列发生器开始随着接收跳频信号跳变。若出现虚警时,系统具有自我调整能力,如图 6。

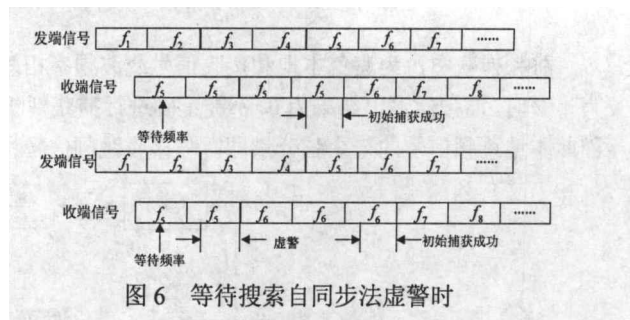


图6 等待搜索自同步法虚警时

图中可看出,最开始本地等待频率为 f_5 ,由于噪声影响,在接收端跳频信号频点为 f_3 时,相关检测量已经大于门限,本地等待频率跳变至 f_6 。但由于实际并未捕获成功,下一跳驻留时间内的相关值小于门限,等待频率变为 f_6 。当接收信号频点为 f_6 时,检测量大于门限,跳频捕获成功。可见,等待搜索自同步法中,虚警会导致捕获延迟。图 7 为其仿真模型。

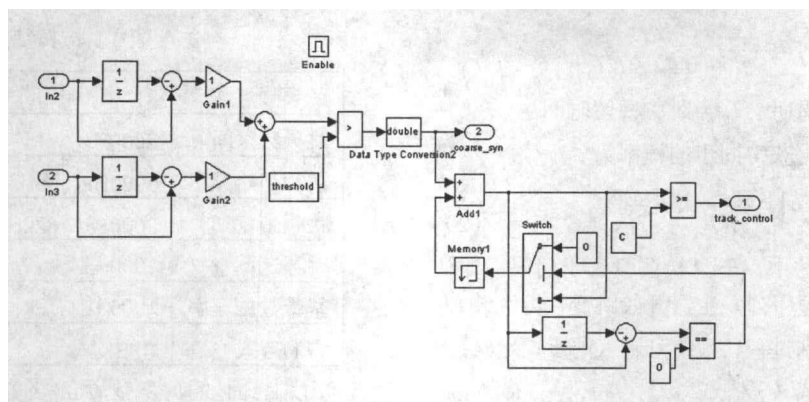


图7 捕获搜索控制仿真模型

上图可看出，相关检测量与门限的比较结果被量化为二进制的0、1值，通过计数器对量化结果累加。为防止虚警造成误捕获，只有当连续 M_1 个“1”出现，即连续 M_1 次相关检测量大于门限时，才认为捕获成功，此时给出跳频跟踪指示信号，即图中的“track_control”，系统进入跟踪环路。仿真中设定 $M_1=5$ 。

3.2.2 漏警控制策略

假设捕获时本地频率在固定频点 f_i 上等待，若信道噪声或干扰在该频点对发射信号影响过大，导致检测量小于门限，则本地频率将不发生任何变化，在此之后的频点也不会发生变化，此即漏警。如图8所示。

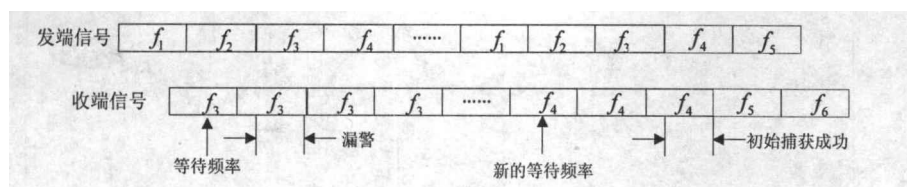


图8 等待搜索自同步法漏警时

图中可看出，漏警时等待频率 f_3 上不能给出本地跳频序列时钟信号，致使一个跳频周期内都不能实现捕获。为解决此问题，本地需有一个判断过程，即在接收信号进入接收端相关运算时进行时间监测，若在一个跳频周

期内未出现检测量大于门限的情况，则表明由于干扰影响造成漏警，此时本地跳频码相位位移一个码片，即将等待频率跳变至下一个频点，再进行等待搜索。

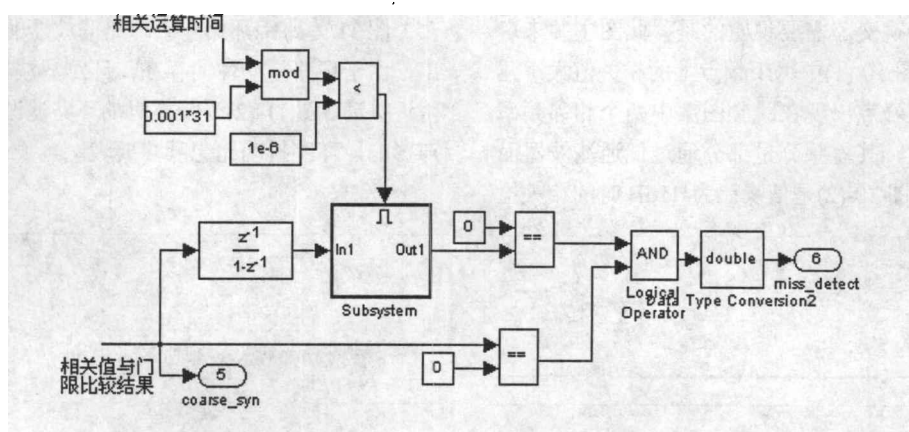


图9 漏警判断仿真模型

如图所示，若仿真时间达到一个跳频周期，且相关检测量与门限比较结果在一个周期内全部为0，则“miss_detect”输出结果为1，由其控制本地等待频率跳变至下一个频点，在新的频率点等待搜索。

3.3 平均捕获时间

跳频通信系统中，接收机与发射机之间初始相位差为均匀分布，其概率密度函数为^[7]

$$p(t)=\frac{1}{NT_h} \quad (0\leq t\leq NT_h)$$
 (1)

其中, N 为跳频序列周期, T_h 为跳频驻留时间

在任意一个码片上获得同步的概率为

$$P=\int_0^{T_h}\frac{1}{NT_h}dt=\frac{1}{N}$$
 (2)

等待搜索自同步法中, 一旦检测量大于门限, 即认为初捕成功, 本地跳频序列发生器开始跳变, 再经过 M_1 个驻留时间的同步识别过程, 系统可进入同步锁定状态, 则平均捕获时间为公式 (3):

$$E(T_{acq})=\sum_{n=1}^N nT_h\cdot\frac{1}{N}+M_1T_h=\frac{N+1}{2}T_h+M_1T_h$$
 (3)

4 系统仿真结果

表 1 给出了系统仿真参数 (仿真时只考虑了加性高斯白噪声)。

表 1 仿真参数

跳频频点数	31
跳频频率间隔	2000Hz
跳频起始频率	5000Hz
跳频带宽	2000×31=62kHz
跳频速率	1000 跳/秒
基带数据速率	1000 比特/秒, 一跳传输 1 个比特
调制方式	BPSK

由上面的参数可得跳频处理增益:

$$G_p=10\lg\frac{BW}{B_a}=10\lg\left(\frac{2000\times31}{1000}\right)=17.9\text{dB}$$
, 其中 BW 为跳频带宽, B_a 为基带信息带宽。

图 10 给出了图 3 中本地载波频率和接收信号频率的相关检测量与频点的关系。

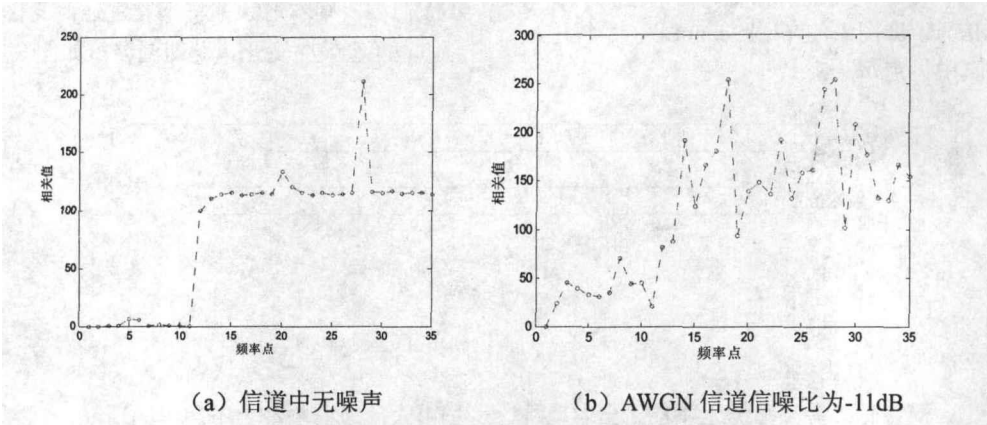


图 10 捕获环路相关检测能量值

图中可看出, 信道中无噪声时, 一旦本地等待频率与接收信号频率一致, 相关检测量大于门限, 本地频率按照跳频图案开始跳变。需要说明的是, 此图中并未启动跟踪环路, 所以图 10-(1)中每个频点上的相关值大小几乎相等, 图中的尖峰点出现在跳频图案中两个相邻频率差值较小的频点上, 其差频分量部分通过低通滤波器而使得相关值过大。图 10-(2)是信噪比为-11dB 时的相关检

测能量值, 噪声影响, 相关值大小变化较大, 但始终大于捕获门限。

图 11 为跟踪环路中码环路滤波器的输出。图中可看出, 由于环路抖动性的存在, 环路滤波器的输出在 0 值附近抖动。图 11-(2)为噪声时的环路滤波器输出, 由于噪声影响, 环路抖动比无噪声要大。

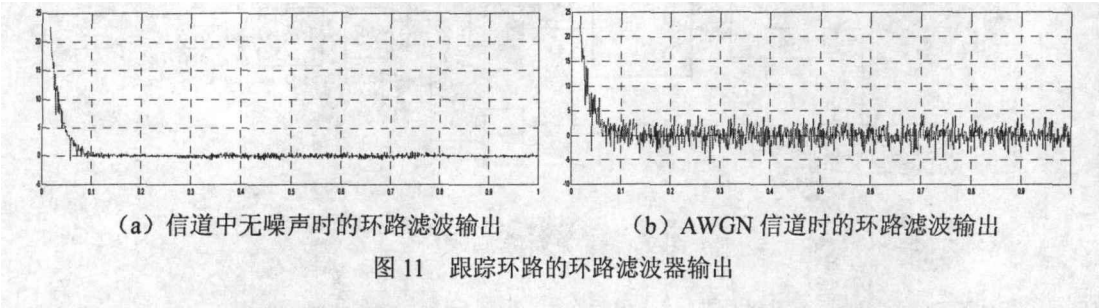
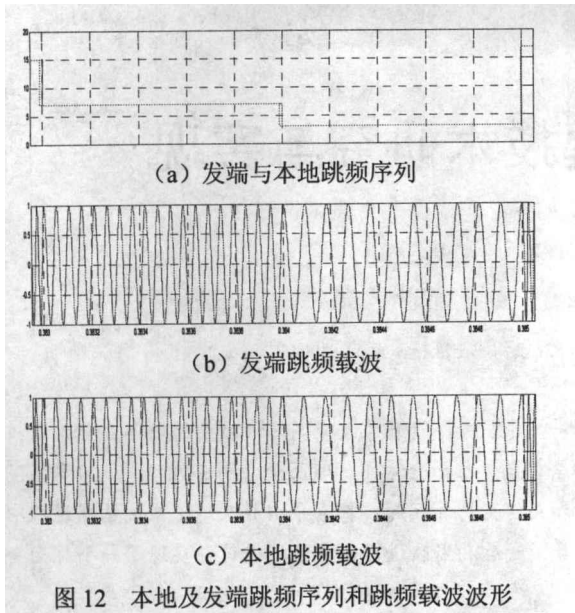


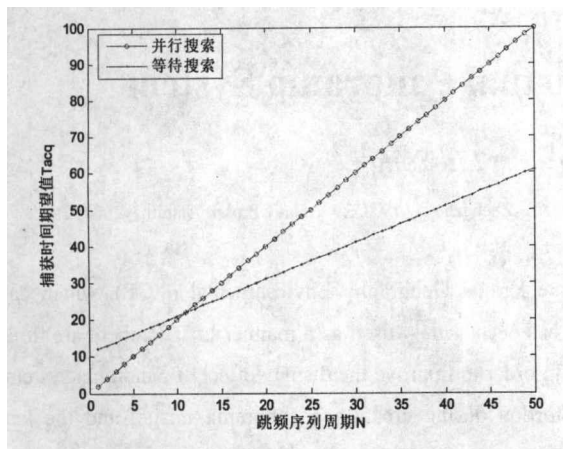
图 11 跟踪环路的环路滤波器输出

本次仿真中, 设定跳频捕获同步识别次数 $M_1=5$, 捕获过程中连续 5 次相关检测量大于门限, 认为捕获成功, 进入跟踪环路。

图 12 为跳频同步时的本地及发端跳频序列和跳频载波波形。



下面给出等待搜索自同步法和并行搜索捕获法的时间比较。



图中可看出, 当跳频序列周期较短时, 并行搜索捕获法比等待搜索捕获法捕获时间短。当跳频序列周期较大时, 并行搜索捕获法捕获时间比等待搜索自同步法大很多。因此, 当跳频序列周期较长时, 等待搜索自同步法有效降低了平均捕获时间。

5 结论

本文利用 Simulink 仿真工具, 搭建了跳频通信系统

的仿真模型, 重点研究了等待搜索自同步法的原理及实现方法, 为跳频信号源自检程序及跳频接收机提供了参考和依据。由于本文采用的等待搜索自同步法只采用了并行搜索的一个支路进行捕获判断, 因此其捕获时间比并行搜索捕获法短, 适用于快速跳频通信系统。可以说, 等待搜索自同步法牺牲了抗干扰能力而换取了捕获时间短的优点。本文跳频调制方式为 BPSK, 信号解调的前提是本地和接收信号载波相位一致。跳频跟踪仿真结果可看出, 信道噪声下码环路滤波器抖动误差较大, 这样就不能保证本地跳频码相位与接收跳频信号码序列完全对准。跳频码序列相位差导致本地和接收信号的跳频频率相位不同, 载波相位差 $\Delta\theta$ 将会直接影响到信号解调。如何正确解调 BPSK 调制信号、实现跳频通信系统信号的正确接收, 提高等待搜索自同步法的抗干扰性能是需要进一步考虑的问题。

参考文献

- [1] 曾兴雯, 刘乃安, 孙献璞. 扩展频谱通信及其多址技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004
- [2] Bernard Sklar. Digital Communications Fundamentals and Applications Second Edition[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002
- [3] Clive A. Putman, Stephen S. Rappaport, Donald L. Schilling. A Comparison of Schemes for Coarse Acquisition of Frequency-Hopped Spread-Spectrum Signals[J]. IEEE transactions on communications, 1983, VOL.31(2). p183-189.
- [4] Marvin K. Simon, Jim K. Omura, Robert A. Scholtz, Barry K. Levitt. Spread Spectrum Communications Handbook(Electronic Edition)[M]. New York: Mc-Graw-Hill, Inc, 2002
- [5] Mi-Kyung Oh, Byunghoo Jung, Dong-Jo Park. Low-Complexity Hop Timing Synchronization in Frequency Hopping Systems[J]. Circuits and Systems, 2006, :2045~2048
- [6] 张欣. 扩频通信数字基带信号处理算法及其 VLSI 实现[M]. 北京: 科学出版社. 2004
- [7] 魏艳华. 跳频通信系统同步捕获技术仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学硕士学位论文, 2007