

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.01.017

基于FPGA的跳频通信接收系统

杨凯, 孔德培, 张鹏, 孙明峰

(中国人民解放军63888部队 技术室, 河南 济源 454650)

摘要: 为了更好的提高通信装备的抗干扰性能, 首先介绍了跳频通信的原理及特点, 然后对基于 FPGA 的跳频通信接收系统的总体设计、开发语言和工具分别进行了介绍, 最后提出了跳频接收控制时序的设计。结果表明, 与常规跳频通信接收系统相比, 该系统具有灵活性强、可靠性高、开发周期短和费用低等优点, 对以后新型跳频通信接收系统的设计有一定的借鉴意义。

关键词: 跳频通信; FPGA; 时序

中图分类号: TP273+.3 **文献标识码:** A

Frequency-Hopping Communication Receiving System Based on FPGA

YANG Kai, KONG De-pei, ZHANG Peng, SUN Ming-feng

(Technical Office, No. 63888 Unit of PLA, Jiyuan 454650, China)

Abstract: To improve the anti-interference performance of communication equipments better, introduces its principle and characteristics of the frequency-hopping communication at first. Then it gives an introduction of the overall design, development language and tool of the receiving system of the frequency-hopping communication based on FPGA. At last, put forward it design of frequency-hopping receiver's timing control. The result shows, compared to the conventional receiving system of frequency-hopping communication, the system has the advantage of better flexibility, high reliability, shorter development cycle and less cost, and it has some reference for the design of new frequency-hopping communication receiving system.

Keywords: Frequency-hopping communication; FPGA; Timing

0 引言

跳频通信技术是具有高抗干扰性、高抗截获能力的扩频技术^[1]。随着数字信号处理技术的发展、自适应技术的应用和软件无线电概念的提出, 跳频技术的发展展现新的前景, 实现更高跳速的跳频电台是跳频通信系统的未来发展方向。与常规规定频通信系统相比, 跳频通信系统具有较强的抗干扰能力。随着跳频通信技术的发展, 如何更好地提高通信装

备的抗干扰性能仍然是现代通信急需解决的重要课题。接收系统是跳频通信系统中非常重要部分, 自适应跳频技术、高速跳频技术、信道编码技术、高效调制解调技术成为近年来跳频技术发展的新动态, 故对基于 FPGA 的跳频通信接收系统^[2]研究。

1 跳频通信的原理和特点

1.1 跳频通信的基本原理

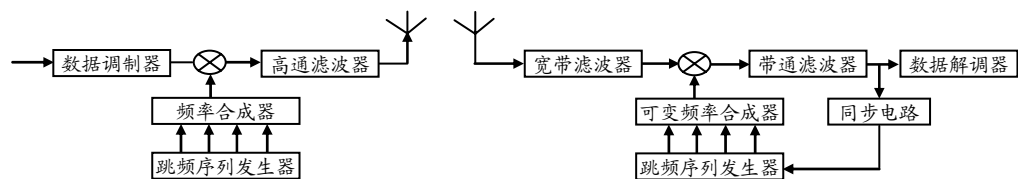


图 1 跳频通信基本原理框图

跳频通信的原理框图如图 1^[3], 信息数据经信息调制成带宽为 B 的信号 D 后进入载波调制。载波频率受跳频序列发生器控制, 在带宽为 B₂ (B₂ >> B₁) 的频带内随机跳变, 实现信号带宽 B₁ 扩展到发射信号使用的带宽 B₂。可变频率合成器受跳频序列控制。跳频是指载波频率在很宽的频带内按跳频图案 (跳频序列) 进行跳变, 其即时载波频

率随跳频的序列值而改变。跳频信号 (带宽仍为 B₁) 经射频滤波器至天线发射后被接收机接收。接收机首先从发射来的跳频信号中提取跳频同步信号, 使本机跳频序列控制的频率跳变与接收到的跳频信号同步, 得到被同步的本地载波。使载波解调获得携带有信息的信号 D, 从而得到发射机送来的信息。

1.2 跳频通信的主要特点^[4]

收稿日期: 2009-07-02; 修回日期: 2009-08-21

作者简介: 杨凯 (1982-), 男, 陕西人, 助理工程师, 从事通信与电子对抗研究。

跳频技术是码控载频跳变的通信方式，在很大程度上取决于它的扩展频谱机理。跳频扩展频谱与直接序列扩展频谱不相同。每跳频驻留时间瞬时所占的信道带宽是窄带频谱，依照跳频图案随时间的变化，这些瞬时窄带频谱在一个很宽的频带内跳变，形成一个跳频带宽。因跳频速率很快，在宏观上实现了频谱的扩展。其具有抗干扰、抗衰落性，信息传输可数模兼容，任意选址功能和通信安全等特点。

2 跳频接收系统设计

系统利用直接序列扩频和跳频相结合的方式传输信息，接收电路结构框图如图 2^[5]。

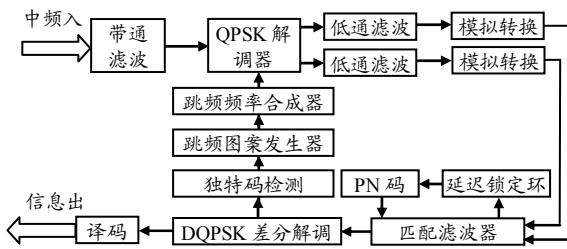


图 2 接收电路结构图

系统基带接收电路的主体是匹配滤波器，整个 DS/FH 系统的关键是接收电路中的同步电路。其中，跳频同步的方案采用自同步法，而 PN 码的同步采用匹配滤波器捕捉和延迟锁定环跟踪的方法。

3 跳频接收控制时序设计

简单地说，跳频通信就是用某个与所传消息无关的扩频函数，将欲传送的基带信号的频谱扩展很多倍后再经信道传输^[6]。一般扩频函数都采用伪随机码，它决定了扩展后的传输信号带宽。扩频用伪随机码序列应具有平衡性、游程特性和相关特性等 3 个特征^[7]。

技术指标设定为跳序列周期 1 年，跳频次数每秒 50~100 次，由此可得：若每秒跳 50 次，则跳频周期为 $1s/50 = 20\text{ ms}$ ，则跳频序列长为：

$$\frac{365 \times 24 \times 3\ 600\ \text{s}}{20\ \text{ms}} = 1\ 576\ 800\ 000 \quad (1)$$

因为跳频序列码长太长，很难计算仿真，故采用复合码作为扩频序列，用 k 个短码组成复合码，而且 k 个短码周期互素，复合码的相位只要经过 $\sum_{i=1}^k p_i$ 次试探就可以测出。

例如，周期 $p_1 = 7$ ， $p_2 = 15$ 的短码 x_1 和 x_2 ，其中 $x_1 = 1110100$ ， $x_2 = 111100010011010$ 构成的模二和复合码 x_3 ，其周期长度 $p_1 p_2 = 105$ ，其序列 x_3 为：

$$x_3 = x_1 + x_2 = x_2 x_2 x_2 x_2 x_2 x_2 x_2 =$$

$$\begin{matrix} 111100010011010111100010011010 \\ 111100010011010000011101100101 \\ 111100010011010000011101100101 \\ 000011101100101 \end{matrix} \quad (2)$$

其捕获次数最多只要进行 $(7+15)=22$ 次试探。模二和的复合码自相关函数为：

$$R_{c_3}(\tau) = R_{c_1}(\tau) R_{c_2}(\tau) \quad (3)$$

其中： $\tau = 0, 1, 2, \dots, p-1 \pmod{p}$ ； $p = p_1 p_2$ 为复合码周期； $R_{c_1}(\tau)$ 和 $R_{c_2}(\tau)$ 分别为码序列 x_1 和 x_2 的自相关函数。

$$R_{c_1}(\tau) = \begin{cases} 1 & \tau = p_1 l = 7l, l = 0, 1, \dots, 14 \\ -\frac{1}{p_1} = -\frac{1}{7} & \tau \text{ 为其它} \end{cases} \quad (4)$$

$$R_{c_2}(\tau) = \begin{cases} 1 & \tau = p_2 l = 15l, l = 0, 1, \dots, 6 \\ -\frac{1}{p_2} = -\frac{1}{15} & \tau \text{ 为其它} \end{cases} \quad (5)$$

$$R_{c_3}(\tau) = \begin{cases} 1 & \tau = 0 \\ -\frac{1}{7} & \tau = 7l, l = 1, 2, \dots, 14 \\ -\frac{1}{15} & \tau = 15l, l = 1, 2, \dots, 6 \\ \frac{16}{105} & \tau \text{ 为其它} \end{cases} \quad (6)$$

复合码的跳频信号的接收捕获过程如下：

开始时，本地码与接收的发码间的相位关系均不相同，即 $\tau \neq 0$ 和 $\tau \neq 0$ ，此时求得的复合码自相关函数必定为最小，即：

$$R_{c_3}(\tau) = \frac{1}{105} \quad (7)$$

固定本地复合码中的子码 $\{a_2\}$ 的相位不变，其相关值设最多经过 7 次试探就可得到 $R_{c_1}(\tau)$ 的最大值，即 $R_{c_1\max}(\tau) = 1$ ，则这时复合码的自相关函数为：

$$R_{c_3}(\tau) = R_{c_1\max}(\tau) R_{c_2}(\tau) = 1 \times \left(-\frac{1}{15}\right) = -\frac{1}{15} \quad (8)$$

此后，将子码 $\{a_1\}$ 的相位固定在上述相位上，再改变子码 $\{a_2\}$ 的相位，同理，最多只需要 15 次试探，就可得到 $R_{c_2}(\tau)$ 的最大值，即 $R_{c_2\max}(\tau) = 1$ ，此时复合码的自相关函数为：

$$R_{c_3\max}(\tau) = R_{c_1\max}(\tau) \times R_{c_2\max}(\tau) = 1 \times 1 = 1 \quad (9)$$

这表明本地复合码 $\{a_3\}$ 已经达到与接收码 $\{a_3\}$ 完全同相位，从而完成了捕获。这里，总共进行 $(7+15)=22$ 次相关试探，但这是最坏的情况，实际次数还会比 22 次少得多，能很好地完成信息接收，增强跳频通信系统的抗干扰能力。

(下转第 62 页)

表 1 OAA 方法中识别结果错误情况

训练样本数目	序号	目标正确类型	错误识别类型	平均错误率
30	42	setosa	virginica	3.75%
	69	versicolor	virginica	
	73	versicolor	virginica	
	84	versicolor	virginica	
	99	versicolor	virginica	
50	139	virginica	versicolor	3.33%
	42	setosa	virginica	
	69	versicolor	virginica	
	73	versicolor	virginica	
	84	versicolor	virginica	
	139	virginica	versicolor	

表 2 SVM+DS 方法中识别结果错误情况

训练样本数目	序号	目标正确类型	错误识别类型	平均错误率
30	101	virginica	versicolor	1.25%
	128	virginica	versicolor	
50	84	versicolor	virginica	0.63%

从表 1、表 2 中可看出，随着训练样本数目的增加，OAA 法和 SVM+DS 方法的识别错误率都在降低，说明训练样本数目越多，对应的识别精度也就越高。在同样的训练样本和检验样本条件下，SVM+DS 方法的识别错误率始终低于 OAA 法，说明采用多传感器信息融合方式的识别精度要优于单一传感器的识别精度；并且 OAA 法的输出是基于“是”或者“否”的硬判决，包含的信息量较少，采用证据合成方法以概率的形式输出最终识别结果，可以对识别结果中所包含的不确定性有更清晰的了解，比如第 101、128 个检验样本对应的目标正确类型均为“virginica”，在训练样本数目为 30 时，采用 SVM+DS 方法在这 2 个检验样本上的概率输出分别为(0.119, 0.435, 0.404, 0.042)、(0.087, 0.436, 0.436, 0.041)，均误判为“versicolor”；在第 84 个检验样本对应的目标正确类型为“versicolor”，在训练样本数目为 50 时，SVM+DS 方法对这个检验样本的概率输出为(0.082, 0.435, 0.445, 0.038)，误判为“virginica”，可见，这种输出方式包含了更多的信息量，也有利于后续的数据处理。在这 3 个错判的检验样本中，目标类型正确焦点与错误焦点所对应的 BPA 函数值相差均不大，这需要增加训练样本数目，以进一步增加合成证据所包含的信息量，提高识别结果的正确性。

4 结论

仿真结果表明，在同样的训练样本和检验样本的情况下，该方法相比 OAA 多分类法，进一步降低了识别结果的错误率，与 OAA 方法的硬判决输

出相比，这种概率输出的形式包含了更多的信息量，更有利于后续数据的处理。

参考文献：

- [1] Vapnik V N. The Nature of Statistical Learning Theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1995.
- [2] 韩崇昭, 朱洪艳, 段战胜. 多源信息融合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 82-90.
- [3] 李建国, 王晓峰, 孙晓明. 冲突证据融合算法性能分析[J]. 兵工自动化, 2008, 27(2): 39-41.
- [4] 史豪杰, 邢清华, 沈继承. 基于支持向量机和无源特征的目标识别方法[J]. 电光与控制, 2009, 16(2): 36-39.
- [5] 王岩, 隋思涟, 王爱青. 数理统计与 MATLAB 工程数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 251-253.
- [6] 曲斌, 孙晓明. 干扰情况下单传感器的数据融合算法[J]. 火箭与制导学报, 2006, 27(1): 305-307.
- [7] Platt J. Probabilities for Support Vector Machines[C//]. Advances in Large Margin Classifiers, Massachusetts Avenue: MIT Press, 2000.
- [8] 李焯, 蔡云泽, 尹汝波, 等. 基于证据理论的多类分类支持向量机集成[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(4): 570-576.
- [9] 周皓, 李少洪. 支持向量机与证据理论在信息融合中的结合[J]. 传感技术学报, 2008, 21(9): 1566-1570.
- [10] UCIMLG. UCI common dataset[DB/OL]. (2005-06-01) [2007-02-16]. <http://mllearn.ics.uci.edu/MLRepository.html>.

(上接第 58 页)

4 结束语

基于 FPGA 的跳频通信接收系统与常规跳频通信接收系统相比，该系统具有灵活性强、可靠性高、开发周期短和费用低等优点，将广泛应用于通信领域。这对以后设计新型的跳频通信接收系统有一定的借鉴意义。

参考文献：

- [1] 查光明, 熊贤柞. 扩频通信[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1990.
- [2] 叶军林, 蔡兆波. 一种基于 FPGA 的通信系统平台的设计[J]. 微计算机信息, 2008(35): 205-206.
- [3] 梅文华. 跳频通信[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [4] 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.
- [5] 李一兵, 曲会英, 吴海训. 软件无线电的扩频通信接收系统的研究与实现[J]. 信息技术, 2003(7): 72-74.
- [6] 沈振元, 聂志泉, 赵雪荷. 通信系统原理(第 1 版)[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995.
- [7] 曾菊玲, 金力军. OFDM 跳频通信系统设计[J]. 移动通信, 2004(2): 155-158.