

超高速跳频通信系统的实现及抗干扰性能

陈亚丁 刘晓晖 程郁凡 李少谦

(电子科技大学通信抗干扰技术国防重点实验室 成都 610054)

摘要: 跳频通信是军事通信领域中的一种重要的抗干扰手段, 该文对超高速跳频通信系统实验平台的实现及其抗干扰性能作了介绍。该实验平台工作在 VHF/UHF 频段, 跳频带宽 51.2MHz, 跳频速率为每秒十万跳, 数据传输速率最高可达 96kbps, 在工作频点被干扰 60% 情况下, 系统仍然可以保持通信, 具有极强的抗截获能力和抗干扰能力。实验台的构成遵循了软件定义无线电思想, 采用了数字直接频率合成器来实现跳频信号的调制和解调。利用超外差原理以及高精度模数转换, 各种信号处理算法及工作参数均可在软件中调整。最后, 文章分析了超高速跳频通信体制带来的抗干扰性能, 并给出实验结果。

关键词: 跳频; 数字直接频率合成器; 抗干扰; 分集合并

中图分类号: TN914.43

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)09-2191-04

The Architecture and Anti-jamming Test of Ultra-Fast Frequency Hop Platform

Chen Ya-ding Liu Xiao-hui Cheng Yu-fan Li Shao-qian

(National Communication Lab, UESTC of China, Chengdu, 610054)

Abstract: Fast Frequency Hopping (FFH) communications is an important technology of anti-jamming in military applications. In this paper, anti-jamming performance and implementation of Ultra-Fast Frequency Hopping (UFFH) test-bed are described. The test-bed capable of transmitting data at 96kbps with hopping rates of up to 100khops/s operates in the VHF/UHF band and keeps capability of communication under the condition in which the 60% of system working spectrum is stained. Based on Software Defined Radio (SDR) technology, the architecture uses a Direct Digital frequency Synthesizer (DDS) to implement demodulation and modulation of Frequency Hopping (FH) signal. Furthermore, different arithmetic of digital signal processing and parameters could be software configured because of the high performance Analog-to-Digital Converter (ADC) and the super-heterodyne architecture. Finally, it is showed by the result of measure and simulation that UFFH test-bed has a robust anti-jamming performance.

Key words: Frequency hop; Direct digital frequency synthesizer; Anti-jamming; Diversity/combining

1 引言

军事通信系统中一项重要的要求就是抗干扰能力强, 跳频通信系统是在不断跳变的频率上传输信息, 降低了传输信号的截获概率, 已被证明具有良好的抗干扰能力^[1]。这些干扰包括瞄准式干扰, 跟踪式干扰, 转发式干扰以及多径干扰。随着战术电台对抗干扰性能和数据传输速率的要求不断提高, 跳频通信系统的跳频速率以及数据传输速率正朝着更高的方向发展。

高速跳频通信有着良好的保密性能和抗干扰性能, 但跳频速率的提高会带来一系列的实现问题, 如频率合成器的快速切换^[2], 短时信号处理算法的策略^[3]等等。许多文献研究了在一定信道统计模型下进行的仿真分析^[4,5], 由于理想化并忽略了许多重要的条件(如频率切换时间, 频率合成器的杂散

等等), 这些仿真分析结果有一定局限性。此外, 大多实际应用的跳频系统并没有充分发挥跳频的优势, 因为它们跳得太慢^[6]。

超高速跳频通信实验平台采用了基于软件定义无线电子的灵活结构, 利用直接数字频率合成技术, 超外差接收技术以及高精度模数转换, 各种信号处理算法及工作参数均可在软件中调整, 如跳频速率, 跳频图案, 分集合并方式, 纠错码类型, 解调门限等等, 这有助于完成各种条件下的测试。实验平台的信号调制方式为 MFSK, 工作频段是 VHF/UHF, 系统支持最高跳频速率为 100khops, 跳频带宽 51.2MHz, 中频接口 70MHz, 数据传输速率可达 96kbps。数据源为文本和图片两种格式, 终端通过比较原始数据, 自动完成并记录各种条件下的误码率的统计。

文章结构安排如下。第 2 节描述了实验平台的结构和功能, 测试环境及步骤在第 3 节阐述, 在第 4 节, 通过计算机仿真和实际系统测量, 比较了自适应加权合并及等增益合并

的抗干扰性能,最后是结束语。

2 实验平台的构成

文章中的系统结构如图 1,图 2 所示。它由终端,基带处理单元,直接数字频率合成单元和射频单元组成。

(1)终端为基于 windows 操作系统的计算机,通过高速串口同基带处理单元连接,完成数据格式的转换,各种参数的设置以及各项指标的统计。数据源为文本和图片两种格式。可调整的参数包括跳频速率,同步门限及解调门限的设置,数据包大小,信道编码效率和译码深度,分集合并方式,交织及解交织深度,干扰频点数的设置。

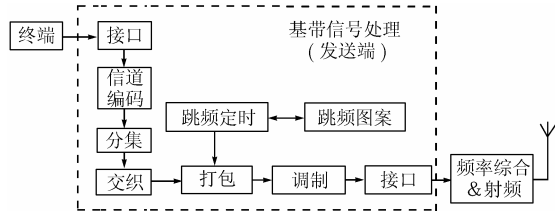


图 1 实验平台发送框图

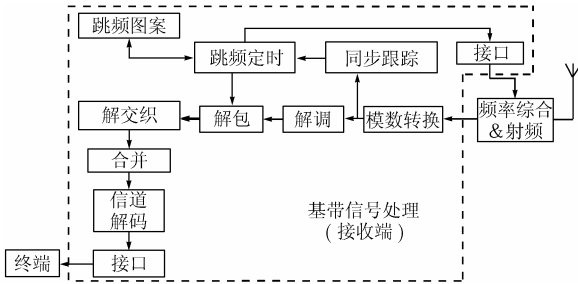


图 2 实验平台接收框图

(2)基带处理单元(图 3)是整个系统的核心部分,它主要由高精度的模数转换器,DSP 以及 FPGA 组成,其中,FPGA 用于控制不同定时,数据缓存以及各种对外接口。所有数字信号处理如信道编解码,同步捕获,分集合并,交织解交织,同步捕获,自适应干扰抑制等等均在 DSP 中完成。下面是实验平台实际采用的一些信号处理算法。

(a)信道编码采用卷积编码,利用 Viterbi 译码软判决进行信道解码,编译码参数可调。

(b)分集采用频域分集方式,在信道条件恶劣情况下,包括多径造成的频率选择性衰落和人为干扰,在 51.2MHz 带宽内对符号进行多个频点的重复发送。

(c)交织方法采用简单的行列交织,用于离散突发误码。

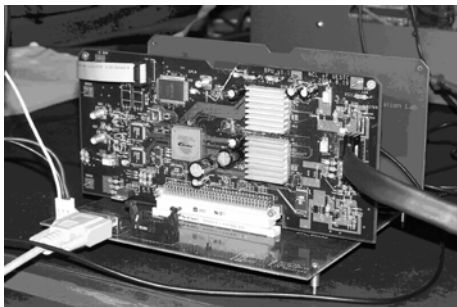


图 3 基带处理单元

(d)解调采用基于 FFT 的 MFSK 软解调。

(e)同步包括捕获和跟踪两个部分,利用系统定义好的跳频图案和伪随机序列之间特殊关系进行快速的相关运算,从而实现频率以及时间上的同步,具体算法将在另一篇论文中描述。

(3)直接数字频率合成单元是快速跳频通信的关键,它的各项指标决定着频率切换速度以及通信质量^[7]。为了保证带内频率合成器输出频谱纯度,通过大量实验,以某公司的一款 DDS 集成电路为核心器件的直接数字频率合成单元设计达到了系统规定要求。图 4 是频率合成器对 280.2MHz 信号输出的带内频谱,可以看到带内的杂散抑制达 60dB 以上,进一步的相位噪声测试结果是偏离载波 1 kHz 处为 -110dBc/Hz。图 5 为发送端以 4FSK 方式进行数据传送,跳频速率 100khop/s,频率合成器输出的跳频信号,图 6 是通过设置带内两个工作频点的反复跳变,利用调制分析仪观察到的频率切换时间。

(4)射频单元由上下变频、带通滤波以及增益控制等电路组成,通过超外差方式将射频信号下变频至 70MHz 中频

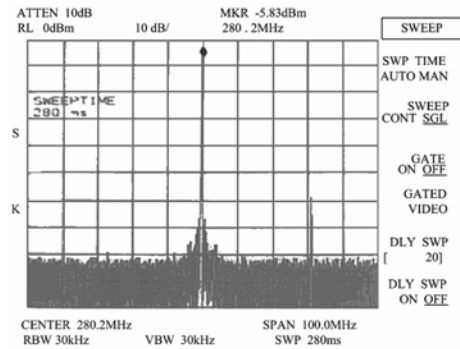


图 4 DDS 带内输出频谱

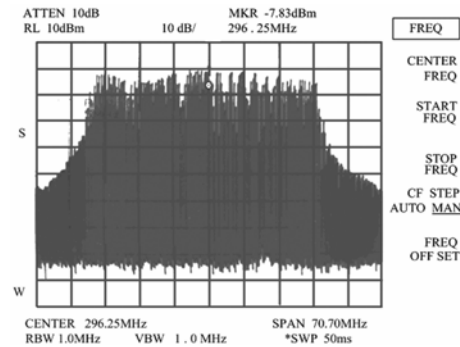


图 5 DDS 输出跳频频谱

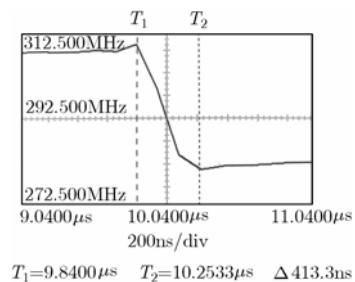


图 6 DDS 频率切换时间

进行带通采样。实验平台所用天线为一对单极天线, 方向增益 4dBi(i 表示等方性)。

3 测试环境与分析

在跳频通信系统中, 当干扰机的跳频速率跟不上通信机跳速时, 即干扰机无法实施跟踪式干扰, 采用部分频带干扰也是很有效的干扰。部分频带干扰是对通信机工作频带内一个固定频带实施干扰, 虽然它的功率谱密度低于跟踪式干扰, 但它所干扰的频带较宽, 通信机若不采取相应措施, 不论跳频速率的高低, 将会引起通信质量的严重下降, 甚至通信中断。

针对部分频带干扰, 有一些相应的技术和方法用于降低其对系统性能的影响, 其中之一也是比较有效的便是将分集合并与宽间隔跳频相结合的方法。将每个信息比特对应的频点分布在整个频带上, 减少了相邻几个跳频频点同时落入部分频带干扰的带宽内的概率, 从而提高系统的抗部分频带干扰的能力^[8,9]。因此, 在超高速跳频通信实验平台中使用了分集合并与全频段宽间隔跳频相结合的抗干扰方法。

在部分频带干扰条件下, 干扰信号的数学模型是一个零均值的宽平稳高斯过程, 定义干扰因子 $\rho(0 < \rho \leq 1)$ 表示受到干扰带宽占总带宽的比例, 总带宽为 W_{ss} , 干扰带宽 $W_I = \rho W_{ss}$, 对于固定的接收干扰功率 J_I , 干扰信号功率谱密度 $J_0 = J_I / W_I$ 。一个特定的发送码元未受到干扰的概率是 $(1 - \rho)$, 以 FH/BFSK 系统为例, 在未加干扰时的误码率为

$$P_B = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right) \quad (1)$$

在受到部分频带干扰后, 式(1)可以改写为

$$P_B = \frac{1-\rho}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right) + \frac{\rho}{2} \exp\left[-\frac{E_b}{2(N_0 + J_0/\rho)}\right] \quad (2)$$

超高速跳频通信实验平台的性能测试分为无线测试和有线测试两个部分。无线方式为功能性测试, 收发天线为一对单极性天线, 发射功率 7dBm, 为方便测试, 收发信机分别放在两个仪器推车上进行不同空间信道下的数据和图片传输。有线方式是将收发端射频通过电缆相连, 便于在传输信号通路上较准确地衰减信号强度和施加噪声和干扰以获得量化指标。由于条件限制, 准确施加部分频带干扰信号较为困难, 实际中通过改变跳频图案中部分频点上的接收值来模拟部分频带干扰, 接收判决时按正常跳频图案进行分集合并。

虽然频域合并的方法很多, 如等增益合并(EGC), 自归一化合并(SNC), 乘积合并(PC), 噪声归一化合并(NNC)等等, 它们的框架结构是相似的(见图 7), 区别在于对接收数据的处理算法不同。在超高速跳频实验平台中, 通过分析不同分集支路的信号特征, 一种自适应加权合并(AWC)方法被采用。设第 i 个频点接收到的第 n 个值为 $s_i(n)$, 包括发送信

号, 干扰信号, 以及噪声。自适应加权合并后的得到

$$y(n) = \sum_{i=1}^M w_i(n)s_i(n) \quad (3)$$

其中 $w_i = F(s_{i\pm\Delta})$, $s_{i\pm\Delta}$ 为第 i 个频点附近的信号值, $F(\bullet)$ 为自适应干扰分析函数。

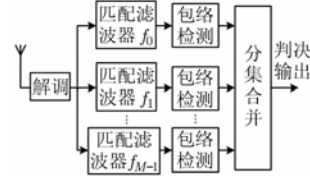


图 7 频域分集合并结构

4 抗干扰性能测试结果

基于实验平台, 针对超高速跳频通信的抗干扰性能进行了实际测试。在无线方式下, 数据和图像传输性能良好, 误比特率低于 10^{-4} , 此时收发两端视距 100m。增加频带干扰, 当干扰因子 $\rho = 0.6$ 时, 系统仍能保持正常通信, 显示了极其稳健的抗干扰性能。表 1 列出了 4 种典型的数据传输速率。在有线模式和计算机仿真环境中, 对数据传输速率为 16kbps 时的自适应加权合并和等增益合并的抗干扰性能作了比较。

表 1 4 种典型数据传输速率

Modulator	Code rate	Diversity gain	Data rate
4FSK	1/2	1	96kbps
2FSK	1/2	1	48kbps
4FSK	1/2	3	32kbps
2FSK	1/2	3	16kbps

图 8 中曲线展示了系统干扰因子 $\rho = 0.1$ 情况下的等增益合并和自适应加权合并仿真性能及实测性能, 很明显, 此时自适应加权合并比等增益合并的抗干扰性能要好 10dB 左右, 其原因是自适应加权合并中被干扰频点上的接收信号权重比等增益合并的权重要小。

$\rho = 0.3$ 时的抗干扰性能曲线如图 9 所示。此时, 虽然自适应加权合并的抗干扰性能要好于等增益合并, 但其优势已经下降了, 这是因为目前对不同干扰带宽的干扰信号, 其干扰抑制算法基本相同, 当干扰频带增加的同时, 对于干扰信号的判决泄漏也增加了, 从而降低了自适应加权合并的抗干扰性能。

事实上, 系统接收机性能不仅受部分频带干扰带宽分布的影响, 它还受跳频图案有关。同时由于算法中包含了对于

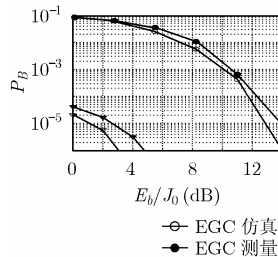


图 8 两种合并的抗干扰性能 ($\rho = 0.1$)

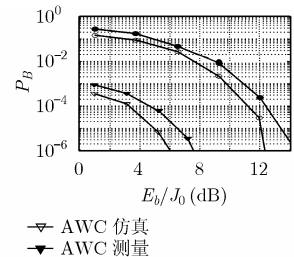


图 9 两种合并的抗干扰性能 ($\rho = 0.3$)

扰信号的多个判决门限, 门限的设置也会对系统性能产生一定的影响, 所以在设置自适应加权合并接收机时需要综合考虑具体的干扰环境, 根据通信环境对各个门限进行合理的设定, 以提高系统的综合抗干扰能力。

5 结束语

本文描述了超高速实验平台的实现及其抗干扰性能。为了验证系统的抗干扰性能, 进行了计算机仿真和实际的平台测试, 并对自适应加权合并以及等增益合并两种方法的抗干扰性能进行了比较分析。结果显示对采用自适应加权合并的超高速跳频通信系统具有稳健优良的抗干扰性能。

系统的自适应抗干扰算法有待进一步改进, 以提高较宽频带干扰时的传输性能, 对超高速跳频带来的抗多径实验还需进一步开展。

参 考 文 献

- [1] Bird J S and Felstead E B. Antijam performance of fast frequency hopped M-ary NCFSK—An overview. *IEEE J. Selected. Areas in Communications.*, 1986, SAC-4(2): 216-233.
- [2] Torosyan A and Willson A N. Exact analysis of DDS spurs and SNR due to phase truncation and arbitrary phase-to-amplitude errors. Proceedings of the 2005 IEEE International, Frequency Control Symposium and Exposition, Vancouver, BC, Canada, 2005: 50-58.
- [3] Lee Kee Hoon and Kim Chan Young, *et al.*. A study on FFT-based coherent frequency hopping technique. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Pusan, Korea, 2001, Volume 3: 2011-2016.
- [4] El Gamal H and Geraniotis E. Iterative channel estimation and decoding for convolutionally coded anti-jam FH signals. *IEEE Transactions on Communications*, 50(2): 321-331.
- [5] Gulliver T A and Felstead E B, *et al.*. A unified approach to time diversity combining for fast frequency hopped NCMFSK-anti-jam processing. MILCOM'94., IEEE, NJ, 1994, vol. 2: 415-420.
- [6] Cabric D, Eltawil A M, Zou H, Mohan S and Daneshrad B. Wireless field trial results of a high hopping rate FHSS-FSK testbed. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(5): 1113-1122.
- [7] Romero-troncoso R de J and Espinosa-Flores-Verdad G. Phase accumulator synthesis algorithm for DDS applications. *Electronics Letters*, 1999, 35(10): 770-772.
- [8] Tan Z and Blake I F. Multipath diversity reception of hybrid DS-SFH spread spectrum multiple access over Rician multipath fading channels. in Proc. IEEE Wireless Commun. Conf., Vancouver, BC, Canada, 1992: 433-436.
- [9] Ezers R E and Felstead E B. An analytical method for linear combining with application to FFH NCFSK receivers. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications.*, 1993, 11(3): 454-464.

陈亚丁: 男, 1969年生, 博士生, 研究方向为无线通信链路传输。
 刘晓晖: 男, 1968年生, 高级工程师, 主要从事高频与微波技术方面的研究。
 程郁凡: 女, 1972年生, 副研究员, 主要从事扩频通信方面的研究。
 李少谦: 男, 1957年生, 教授, 博士生导师, 从事扩频通信、移动通信方面的教学和研究。