

基于 STFT 的宽带数字 ESM 接收技术

王旭东, 宋茂忠

(南京航空航天大学信息科学与技术学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 提出了一种新的基于瞬时测频的宽带数字电子支援 (electronic support measure, ESM) 接收技术。首先对输入信号进行短时傅里叶变换, 通过对变换结果进行快速插值, 实现瞬时测频; 然后利用多门限完成瞬时频域检测, 并根据检测带宽进行抽取。这种新的接收技术能够有效解决 ESM 系统对宽带同时到达信号的侦收难题, 且算法结构规整, 易于用现场可编程逻辑门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 芯片进行硬件实现。计算机仿真结果表明, 系统单信号检测灵敏度可达 -5 dB, 当输入信噪比为 -5 dB~ 15 dB 时, 单信号正确检测概率可达 90% 以上, 动态范围达 20 dB, 双信号瞬时动态范围可达 18 dB。

关键词: 电子支援; 同时到达信号; 短时傅里叶变换; 瞬时测频

中图分类号: TN 911

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2010.09.05

Wideband digital ESM receiving technique based on STFT

WANG Xu-dong, SONG Mao-zhong

(Coll. of Information Science and Technology, Nanjing Univ. of

Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A novel wideband digital electronic support measure (ESM) receiving technique based on instantaneous frequency measurement (IFM) is proposed. Firstly, a short time Fourier transform (STFT) is put on the input signal. The IFM is realized by fast insertion to the STFT results. Secondly, an instantaneous frequency detection technique is implemented by using multi-threshold. Lastly, the output is down sampled according to the detective bandwidth. The difficulty of capturing wideband simultaneous signals in ESM system can be conquered according to this novel receiving technique. Furthermore, the scheme can be expediently implemented in field programmable gate array (FPGA) device due to its regular fabric. Computer simulation results indicate that the detection sensitivity of one signal can reach -5 dB. The right detection rate can overcome 90 percent so as the input signal-to-noise ratio (SNR) is in the range of -5 dB to 15 dB. That is 20 dB dynamic range can be got. The simulation results also show that 18 dB double signal simultaneous dynamic range can be achieved by using this scheme.

Keywords: electronic support measure (ESM); simultaneous signal; short time Fourier transform (STFT); instantaneous frequency measurement (IFM)

0 引言

为满足现代电子战需求, 侦察接收机应具有宽带接收、高灵敏度和动态范围、短脉冲检测、同时信号检测、高的频率分辨率等性能^[1]。现有模拟体制接收机很难满足上述要求。随着 A/D 技术的进步和数字信号处理 (digital signal processing, DSP)、现场可编程逻辑门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 芯片处理能力的提高, 宽带数字

接收技术成为研究热点^[2-5]。其中, 瞬时测频 (instantaneous frequency measurement, IFM) 接收机、信道化接收机和电子支援 (electronic support measure, ESM) 接收机是当前国内外研究重点^[6-7]。IFM 接收机体积小, 能对短脉冲信号进行较精确测频, 但不能处理同时到达信号; 信道化接收机通过采用一组滤波器来分选不同频率信号, 能有效分辨窄带同时到达信号, 但信道化接收机在脉冲的前后沿存在“鬼儿效应”, 强信号信道串扰大, 对宽带同时到达信号会产生

收稿日期: 2008-07-08; 修回日期: 2010-03-18。

基金项目: 国家自然科学基金 (60572108); 南京航空航天大学青年创新基金 (Y0618-041); 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目 (NS2010109) 资助课题

作者简介: 王旭东 (1978-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为电子侦察、FPGA 应用。E-mail: xudong@nuaa.edu.cn

误判;ESM 接收机通过对输入信号进行下变频、滤波和采样,能够在有限带宽内完成检测、测频和同时到达信号分辨等功能,精度高、分辨力强,但带宽窄,为了有效覆盖侦察带宽,需多机并联,成本高。

本文综合考虑上述不同接收技术优势,提出一种新的基于瞬时测频的宽带数字 ESM 接收技术,淡化了信道概

念,省去了信道判断逻辑。首先对输入宽带信号(采样频率 $f_s = 400$ MHz)直接作短时傅里叶变换(short time Fourier transform, STFT);然后根据一种多门限判决逻辑,取出最大两根谱线,进行频率估计、信号判别和带宽估计;再作 IFFT 转回时域,根据估计带宽,对输出信号进行抽取,在保证频率不混叠的前提下,降低了数据率。其原理框图如图 1 所示。

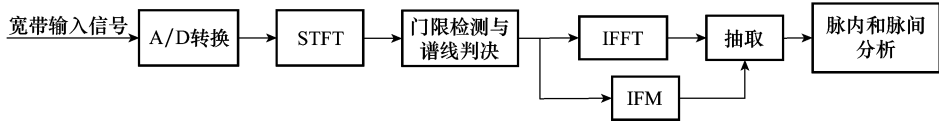


图 1 宽带数字 ESM 接收技术原理图

1 系统设计

系统首先对宽带输入信号作 STFT 运算,然后在频域进行检测,确定输入信号个数及其对应频率。频域检测对多信号分离能力强,灵敏度高。通过门限比较和快速傅里叶逆变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)运算,可有效提高输入信噪比。

1.1 短时傅里叶变换

若用 N 表示矩形窗长度, M 表示窗滑动的点数, k 表示频率分量或是信道序列号,则 STFT 可记为

$$X(k) = \sum_{n=M}^{N+M-1} x(n) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (1)$$

STFT 的长度 N 和重叠点数 M 是重要的参数,与最小脉宽和频率分辨率有关,决定了接收机的灵敏度。而最小脉宽(时间分辨率)和频率分辨率二者是互相矛盾的,折中考虑并根据 FPGA 芯片实时处理要求,本设计选 $N = 64$, $M = 32$,即数据有 50% 重叠。若最小脉冲宽度为 64,则在最恶劣情况下,最短脉冲有 75% 的数据落入快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)窗内,到达时间(time of arriving, TOA)分辨率为 32 倍采样间隔。

STFT 运算后与前一个时间帧得到的频率成分进行比较,如果两个时间窗某个频率区域包含相同的频率,那么就认为它们属于同一个信号,反之认为是新信号。同时,判断是否有信号结束:时域窗有 50% 的重叠,若连续两个频域帧中无相同或相邻频率,则认为原频率区域对应的信号结束。

与信道化接收机不同的是,这里的频域检测范围是整个接收信号带宽,而不是单个信道,因此 STFT 中不需要对原始信号 $x(n)$ 作滤波处理,克服了宽带同时到达信号的信道串扰问题。下面考虑采用多门限检测方法以提高接收机的瞬时动态范围。

1.2 门限检测与谱线判决

本设计在频域检测时,首先要设置一个初始门限 r_1 ,可根据频域噪声分布确定。假设时域噪声为高斯白噪声,则其功率为

$$\sigma^2 = E[x_n x_n^*] \quad (2)$$

与之相对应的频域噪声功率为

$$\begin{aligned} \sigma_f^2 &= E \left[\left(\sum_m^{N-1} x_m e^{-\frac{j2\pi mk}{N}} \right) \left(\sum_n^{N-1} x_n e^{-\frac{j2\pi nk}{N}} \right)^* \right] = \\ &= E \left[\sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} x_m x_n^* e^{-\frac{j2\pi mk}{N}} e^{\frac{j2\pi nk}{N}} \right] = \\ &= \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E(x_m x_n^*) e^{-\frac{j2\pi mk}{N}} e^{\frac{j2\pi nk}{N}} = N\sigma^2 \end{aligned} \quad (3)$$

因为 FFT 是线性运算,所以频域噪声功率谱分布也是 Rayleigh 型的,相比时域只是方差增加了 N 倍。其包络概率密度函数为

$$p_f(r) = \frac{r}{\sigma_f^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma_f^2}} = \frac{r}{N\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2N\sigma^2}} \quad (4)$$

则虚警概率为

$$p_{faf} = \int_{r_1}^{\infty} p_f(r) dr = e^{-\frac{r_1^2}{2N\sigma^2}} \quad (5)$$

若给定虚警时间 T_f ,则可得频域虚警概率为

$$p_{faf} = \frac{N}{T_f f_s} \quad (6)$$

接收机设计时,首先给定 T_f ,然后根据式(5)和式(6),可求出虚警概率和初始门限 r_1 。为提高接收机灵敏度,初始门限应尽量低。但在大信号情况下,单输入时接收机可能输出多个信号,为此本文考虑浮动门限。即在初始门限检测出存在信号的情况下根据区域最大谱线的幅度设定频率区域并提高该区域的门限,从而下一个频域帧检测时可以忽略大信号的旁瓣。在检测到信号结束时,将该信号起止频率对应区间中的门限还原为初始门限,以待下一次检测。

对每帧数据进行多门限检测的同时,可取出频率区间中最大两根谱线,再进行插值,可估计出信号的起始频率和带宽。

1.3 插值 FFT 法瞬时测频

设频域检测中大于门限的最大谱线值为 $|X(k_0)|$, $|X(k_1)|$ 次之。利用这两根谱线进行插值 FFT 法瞬时测频的计算式为

$$\hat{f}_c = \frac{f_s}{N} \left(k_0 \pm \frac{|X(k_1)|}{|X(k_0)| + |X(k_1)|} \right) \quad (7)$$

当 $k_0 > k_1$ 时,取负号;当 $k_0 < k_1$ 时,取正号。该算法在适度的信噪比条件下,当 f_c 位于两个离散频率的中心区域时,计算出的 \hat{f}_c 性能很好,频率估计的误差远小于 FFT 算法。反之,当信噪比较低且 \hat{f}_c 十分接近离散频率点时,估计的误差将可能大于 FFT 算法。文献[8]对其进行了改进。首先用式(7)进行频率粗估计得 \hat{f}_c ,然后判断 \hat{f}_c 是否位于相邻量化频率点中心区域。如果是,则将 \hat{f}_c 作为最后的频率估计值;否则对原信号进行适当的频移,使新信号的频率位于两个相邻离散频率点的中心区域。再用式(7)进行频率估计,这样可保证较高的估计精度,算法性能达到 Cramer-Rao 界。

1.4 时域抽取

在频域检测同时,取出区域最大两根谱线,然后对其作 64 点 IFFT,将频域信号转化到时域,以便进行后续脉内和脉间参数估计。转化后的时域信号采样率仍为 f_s ,而带宽只有两根量化谱线。根据多速率信号处理理论,可对该时域信号进行抽取。抽取率由估计出的信号带宽确定。

2 系统仿真

采样速率:400 MHz;FFT 和 IFFT 点数:64,FFT 有 50%重叠。

单信号情况:输入单个线性调频(linear frequency modulation, LFM)信号,加高斯白噪声,脉宽 $5 \mu\text{s}$,调频系数 $10\text{e}12$,起始频率 10 MHz,信噪比从 $-10 \text{ dB} \sim 20 \text{ dB}$,对每次输入作 1 000 次仿真,检测概率如图 2 所示。IFFT 后 5 倍抽取,并对线性调频信号进行参数估计^[9],结果如图 3~图 5 所示。仿真结果表明,当输入信噪比为 $-5 \text{ dB} \sim 15 \text{ dB}$ 时,单信号正确检测概率可达 90%以上;单信号动态范围 20 dB;LFM 信号各参数估计精度高,起始频率估计均方根误差小于 9%,脉宽估计均方根误差小于 5%,调频系数估计均方根误差小于 1%。

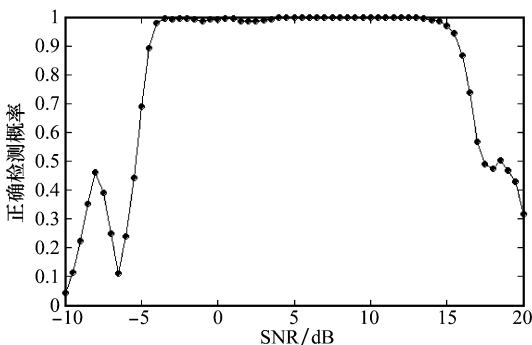


图 2 单信号正确检测概率

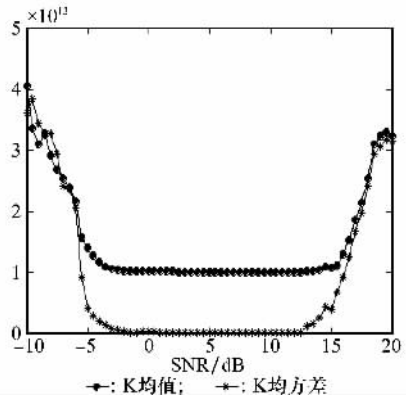


图 3 单信号调频系数估计均值和均方差

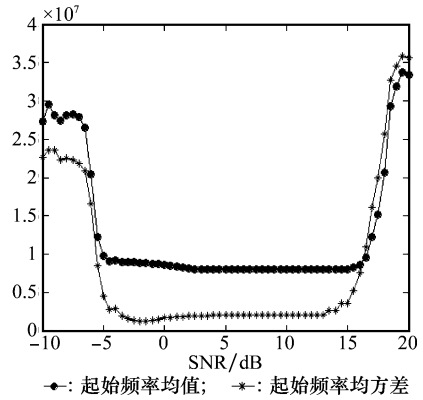


图 4 单信号起始频率估计均值和均方差

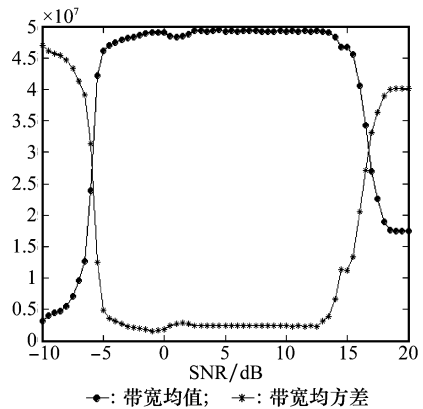


图 5 单信号带宽估计均值和均方差

双信号情况:输入两个线性调频信号,加高斯白噪声,两信号同时到达,脉宽都是 $5 \mu\text{s}$,调频系数均为 $10\text{e}12$,起始频率分别为 10 MHz 和 100 MHz,信噪比分别从 $-10 \text{ dB} \sim 5 \text{ dB}$ 和 $20 \text{ dB} \sim 5 \text{ dB}$ 变化。检测结果如图 6 所示。双信号瞬时动态范围达 18 dB。

3 结论

本文结合电子战侦察接收机国防预研需求,提出了一种新的基于瞬时测频的宽带数字 ESM 接收技术。通过对输入信号的短时傅里叶变换结果进行快速插值,实现了瞬

时测频;并利用动态门限判决完成了瞬时频域检测和抽取。这种新的接收技术,能够有效解决 ESM 系统对宽带同时到达信号的侦收难题,且算法结构规整,易于用 FPGA 芯片进行硬件实现^[10-11]。计算机模拟结果表明,系统单信号检测灵敏度可达 -5 dB,当输入信噪比为 -5 dB~15 dB 时,单信号正确检测概率可达 90% 以上;动态范围达 20 dB;双信号瞬时动态范围可达 18 dB。满足了现代电子战对侦察接收机宽带接收、高灵敏度、大动态范围、同时到达信号检测等性能要求。

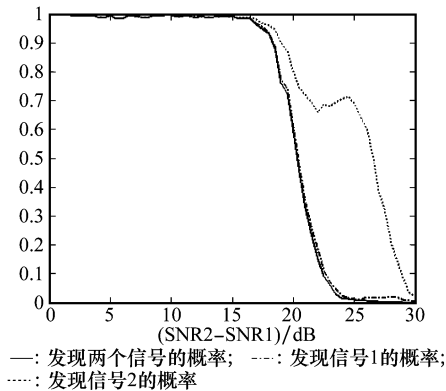


图 6 双信号正确检测概率

参考文献:

- [1] Mohammad A K, Mohammad M N. CFAR adaptive threshold for ESM receiver with logarithmic amplification[J]. *Signal Processing*, 2004, 84(1): 41 - 53.
- [2] Wang Hong, Lu Youxin, Wang Xuegang, et al. Efficient structures for wideband digital receiver[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2006, 17(3): 483 - 486.
- [3] Anis L, Loïc J, Patricia D, et al. A reconfigurable RF sampling receiver for multistandard applications[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2006, 7(7): 785 - 793.
- [4] Lei Feng, Won Namgoong. A frequency channelized adaptive wideband receiver for high-speed links[C] // *IEE Proc. of Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 84(6): 123 - 133.
- [5] Uros M, Brian C, Matjaz V. Design and evaluation of a low-level RF control system analog/digital receiver for the ILC main LINACs[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2008, 594(1): 90 - 96.
- [6] Hassan Z, Balasubramaniam N. Practical architecture of a broadband sensing receiver for use in cognitive radio[J]. *Physical Communication*, 2009, 2(1): 87 - 102.
- [7] Donka A, Lyudmila M. Joint target tracking and classification with particle filtering and mixture Kalman filtering using kinematic radar information[J]. *Digital Signal Processing*, 2006, 16(2): 180 - 204.
- [8] 王旭东, 刘渝, 邓振森. 基于修正 Rife 算法的正弦波频率估计及 FPGA 实现[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(4): 621 - 624. (Wang Xudong, Liu Yu, Deng Zhengmiao. Modified Rife algorithm for frequency estimation of sinusoid and its implement in FPGA[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(4): 621 - 624.)
- [9] Chen Wenwu, Chen Rushan. Multi component LFM signal detection and parameter estimation based on Radon-HHT[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2008, 19(6): 1097 - 1101.
- [10] 王旭东, 刘渝. 全并行结构 FFT 的 FPGA 实现[J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38(1): 96 - 100.
- [11] Kalomiros J A, Lygouras J. Design and evaluation of a hardware/software FPGA based system for fast image processing[J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2008, 32(2): 95 - 106.