

# 基于频谱压缩接收的宽带/超宽带线性调频信号参数估计

沈显祥 叶瑞青 唐斌  
(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**摘要:** 该文提出了一种新的宽带/超宽带线性调频信号的接收方法, 它将宽带/超宽带线性调频信号通过射频通道的频谱压缩网络变成窄带信号, 数字域用逆频谱压缩函数对压缩信号进行非线性重构, 原线性调频信号的调制斜率和初始频率可通过重构信号精确估计。计算机仿真证实了算法的有效性。

**关键词:** 频谱压缩; 信号重构; 调制斜率; 初始频率

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0023-03

## Parameters estimation of Wideband/ Ultra-Wideband LFM Signal Based on Spectrum Compressing Receiving

Shen Xian-xiang Ye Rui-qing Tang Bin  
(School of Electronic Engineering, UESTC of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** An new method, which compresses the spectrum of the wideband / ultra -wideband LFM signal in radio channel to turn the wideband/ ultra -wideband signal into the narrowband signal, is presented in this paper. Using the inverse compression function, the compressed signal is reconstructed by nonlinear interpolation in digital domain. Moreover, the modulation slope and initial frequency of the original signal can still be estimated from the reconstructed LFM signal precisely. Computer simulation shows its validity.

**Key words:** Spectrum compression; Signal reconstruction; Modulation slope; Initial frequency

### 1 引言

目前受ADC水平限制, 宽带/超宽带雷达信号接收已成为雷达和电子对抗领域关注的研究课题。模数混合信道化接收<sup>[1, 2]</sup>似乎是一种可行的技术方案, 但信道之间容易产生串扰, 且设备复杂, 信道之间的信息融合目前尚未有效解决。于是, 人们提出了欠Nyquist采样思路。欠采样会产生频谱混叠, 给后续信号参数估计带来相当大的困难。为此, 一些学者分别提出了在射频通道通过延迟和(或)数据域利用余数定理实现包括信号频率在内的信号参数无模糊估计方法<sup>[3-5]</sup>。事实上, 欠采样将采样频率之外的所有信号信息折叠至采样频率以内, 会降低接收机灵敏度。本文针对宽带/超宽带线性调频信号的接收和处理问题, 提出了一种信号非线性频谱压缩接收的思路。频谱压缩是在射频通道用一个压缩网络对信号进行频谱变换, 使宽带/超宽带信号变成窄带信号。这样既可用高比特、低采样率的ADC对信号采样, 提高了接收机的动态范围和灵敏度, 又可减轻后续数据传输和处理压力。压缩后的信号经过ADC采样后在数字域用逆频谱压缩函数对信号进行重构并估计出信号的参数。目前射频通道实现信号频谱非线性压缩方法尚未成熟, 但是该技术具有较强的理论指导意义。计算机仿真表明了该理论分析的可行性。

### 2 频谱压缩原理

宽带/超宽带射频信号在射频通道经过频谱压缩网络使

其变为窄带信号, 用高比特、低采样率ADC进行采样, 这样既可增加信号接收动态范围和灵敏度, 又可减轻后续数据传输和处理压力。在数字域采用频谱压缩网络的逆函数实现压缩信号的非线性重构, 结合有关信号处理算法可实现信号参数估计。宽带/超宽带雷达信号频谱压缩接收系统原理框图如图1所示。图中频谱压缩网络及其信号重构是实现宽带/超宽带信号频谱压缩接收和处理的关键。下面分别予以分析。

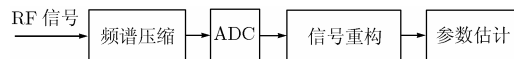


图 1 宽带/超宽带信号频谱压缩接收系统原理框图

射频通道的频谱压缩网络目前尚处于研究之中, 本文讨论频谱压缩原理。信号频谱压缩原理如图 2 所示。图中带宽为  $B$  的宽带/超宽带信号通过频谱压缩函数为  $\Omega_1 = h(\Omega)$  的非线性频谱压缩网络后, 变换带宽为  $B_1 (< B)$  的窄带信号。事实上, 图 2 中  $\Omega_1 = \Omega$  以下区域的所有函数均可进行信号频谱压缩, 应用中可视具体情况而选择。

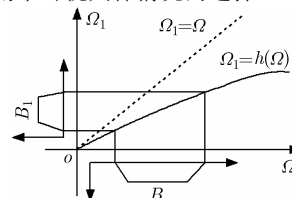


图 2 频谱压缩原理

设频谱压缩函数为  $h(\Omega)$ , 宽带/超宽带信号的 Fourier 变换为  $X(\Omega)$ , 压缩后窄带信号的 Fourier 变换  $S(\Omega_1)$  与  $X(\Omega)$  的数学关系为

$$S(\Omega_1) = X(h^{-1}(\Omega_1)) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-jh^{-1}(\Omega_1)t} dt \quad (1)$$

重构后信号的 Fourier 变换  $X'(\Omega)$  为

$$X'(\Omega) = S(h(\Omega)) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-jh(\Omega)t} dt \quad (2)$$

压缩函数可以为线性函数或非线性函数。实际中, 由于射频器件的非线性影响, 频谱压缩网络常表现非线性, 所以下面仅分析  $h(\Omega)$  为非线性压缩函数的情况。

根据上面分析的频谱压缩函数的范围, 假设  $h(\Omega)$  为幂指数小于 1 的幂函数(其它非线性函数如  $S$  函数和双线性函数等分析类似), 且为

$$h(\Omega) = \sqrt{\Omega}, \quad \Omega > 0; \quad h^{-1}(\Omega) = \Omega^2, \quad \Omega > 0 \quad (3)$$

由式(1)、式(2)和式(3)可以求出压缩信号和重构信号的 Fourier 变换分别为

$$S(\Omega_1) = X(\Omega_1^2) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\Omega_1^2 t} dt \quad (4)$$

$$X'(\Omega) = S(\sqrt{\Omega}) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\sqrt{\Omega}t} dt \quad (5)$$

由于宽带/超宽带雷达信号多为线性调频信号, 所以下面仅对线性调频信号进行分析。宽带/超宽带线性调频信号经非线性压缩后的频谱与原信号频谱比较, 以及压缩信号的短时傅里叶变换(STFT)的结果分别如图 3 和图 4 所示。

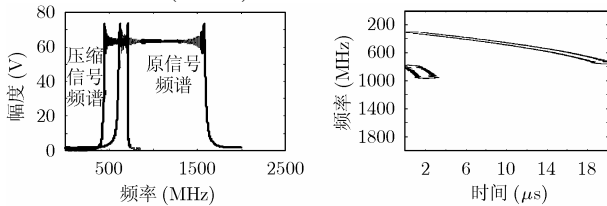


图 3 原信号和压缩信号频谱图

图 4 压缩信号的 STFT

从图 3 和图 4 看出, 非线性压缩信号频谱变窄且幅度没有变化, 非线性压缩后的信号不再是线性调频信号, 压缩后信号的时频图由原来的直线变为图 4 结果, 发生了失真。

### 3 非线性压缩信号重构原理

由上面非线性压缩原理分析可知, 非线性压缩后信号的时频图发生了失真, 非线性压缩信号不再是线性调频信号。为了估计原信号的参数必须对非线性压缩信号进行重构。

将  $S(\Omega_1)$  做  $N$  点离散化后为  $S(\omega)$ ,  $\omega \in (0, 2\pi]$ 。根据式(1), 有

$$\left. \begin{aligned} S\left(\frac{2\pi}{N}\right) &= X\left(h^{-1}\left(\frac{2\pi}{N}\right)\right) \\ S\left(\frac{4\pi}{N}\right) &= X\left(h^{-1}\left(\frac{4\pi}{N}\right)\right) \\ &\vdots \\ S(2\pi) &= X(h^{-1}(2\pi)) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

将式(3)中的逆压缩函数做  $N$  点离散化后为  $h^{-1}(\omega) = \sqrt{\omega}$ ,  $\omega \in (0, 2\pi]$ , 上式可表示为

$$\left. \begin{aligned} S\left(\frac{2\pi}{N}\right) &= X\left(\sqrt{\frac{2\pi}{N}}\right) \\ S\left(\frac{4\pi}{N}\right) &= X\left(\sqrt{\frac{4\pi}{N}}\right) \\ &\vdots \\ S(2\pi) &= X(\sqrt{2\pi}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

从式(6)和式(7)可以看出, 对压缩信号进行均匀采样相当于对原信号进行非均匀采样。所以, 本文采用非线性内插的方法对压缩信号进行重构。本文采用的内插函数为逆压缩函数  $h^{-1}(\Omega) = \Omega^2$ , 并利用最近邻点内插(插入的值取与其最近邻点的值)的方法进行内插。对于重构后的信号, 采用线性解线调方法<sup>[6,7]</sup>估计其调制斜率和初始频率。

### 4 仿真试验

实验中信号参数设置为线性调频信号的带宽  $BW$  为 1GHz、时宽  $T$  为 20μs 和初始频率  $f_0$  为 200MHz, 频谱压缩网络的压缩函数为  $h(\Omega) = \sqrt{\Omega}$ 。压缩前后的信号时域、频域和时频域结果及信号调制斜率  $k$ , 中心频率  $f_0$  的均方根误差随信噪比关系如图 5~图 10 所示。

从图 5~图 8 可以看出, 恢复后的信号时域、频域和时频域结果和原信号比较存在着误差, 但是恢复后的信号不影响信号参数估计。

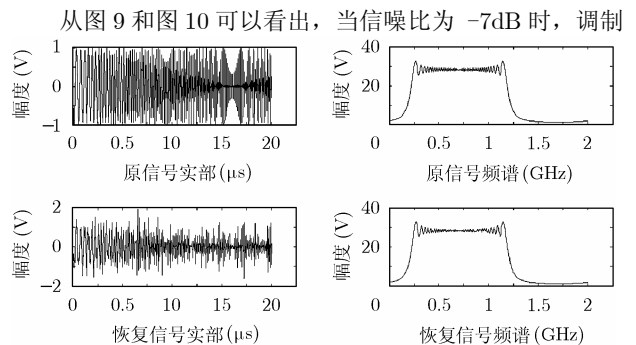


图 5 原信号和恢复信号的时域图

图 6 原信号和恢复信号的频谱图

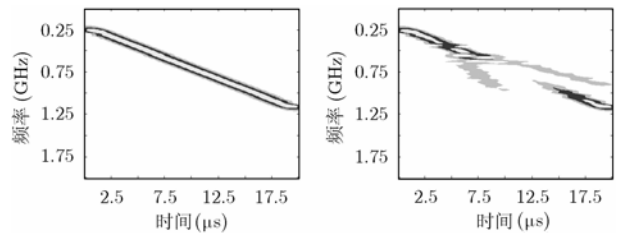


图 7 原信号 STFT

图 8 恢复信号 STFT

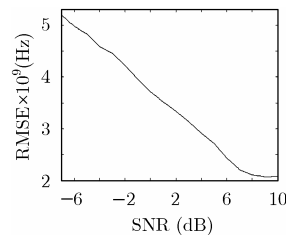


图 9 调制斜率估计的均方根误差曲线

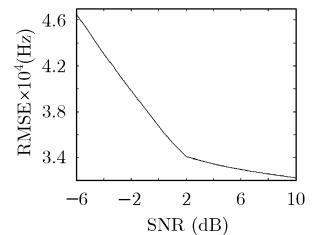


图 10 初始频率估计的均方根误差曲线

斜率估计的均方根误差小于 600MHz/S, 相对误差约为  $1/10^5$ ; 初始频率估计均方根误差约为4.6MHz, 相对误差小于  $5/10^4$ , 估计精度较高。

## 5 结束语

频域压缩接收在射频通道用频谱压缩网络对信号进行频域压缩, 使宽带/超宽带信号变成窄带信号, 这样既可用高比特低采样率的 ADC 对信号采样, 提高了接收信号的动态范围和灵敏度, 又可减轻后续数据传输和处理压力。上面分析和实验表明, 频域压缩信号可以在数字域进行重构并进行参数估计。尽管本文提出的方法尚属理论阶段, 不少工作尚需深入和突破, 但随着技术的发展, 在射频通道若可以找到器件构造频谱压缩网络对信号进行非线性频谱压缩, 它将为宽带/超宽带雷达信号接收和宽频段信号高概率截获带来新的技术途径。因此, 本文工作对这方面的研究将起到一个抛砖引玉的作用。

## 参考文献

- [1] Taylor J D. Ultra-wideband radio technology[M]. CRC Press LLC, 2001.
  - [2] 陈隽永, 徐继麟. 超宽带雷达接收机设计[J]. 电子科技大学学报, 2000, 29(5): 461-464.
  - [3] 唐斌, 肖先赐. 基于 FFT 的欠采样带宽信号的频率无模糊估计[J]. 数据采集与处理, 1998, 13(1):17-20.
  - [4] Zoltowski M D, and Mathews C P. Real-time frequency and 2-D angle estimation with sub-Nyquist spatio-temporal sampling, ICASSP-93, Minnesota:1993, IV: 117-120.
  - [5] 刘渝, 靖晟, 席轶敏, 宽带信号处理解模糊方法[J]. 数据采集与处理, 2001, 16(3): 320-323.
  - [6] 刘渝. 快速解线调技术[J]. 数据采集与处理, 1999, 14(2): 175-178.
  - [7] Muhamad Z. Ikram K, Abed-Meraim, and Hua Yingbo. Estimating the parameters of chirp signals:An iterative approach. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1998, 46(12): 3436-3440.
- 沈显祥: 男, 1964 年生, 博士生, 现从事雷达系统及信号处理研究。  
叶瑞青: 女, 1980 年生, 硕士生, 现从事宽带雷达接收技术研究。  
唐斌: 男, 1965 年生, 博士后, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达、通信和电子对抗系统及信号处理研究与教学。