

## 一种基于 ITD 算法的直扩信号检测算法

安金坤<sup>①②</sup> 田斌<sup>①②</sup> 孙永军<sup>①</sup> 易克初<sup>①</sup> 于全<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室 西安 710071)

<sup>②</sup>(中电集团第 36 研究所通信对抗技术国防科技重点实验室 嘉兴 314001)

<sup>③</sup>(中国电子设备系统工程公司研究所 北京 100039)

**摘要:** 固有时间尺度分解(ITD)算法是一种局域波分解算法,该文对直接序列扩频信号 ITD 分解,提出了一种通过频域粗搜索和细搜索分别检测直扩信号码片速率和载波频率的快速算法。该算法以瞬时幅度作为分析参量,先设置截止频率对信号低通滤波处理,并通过引入伴随频率达到抑制噪声的目的,利用了固有时间尺度分解算法时频分辨率高,运算速度快的优势。仿真结果显示在-15dB 信噪比下能够有效地检测出码片速率和载波频率。

**关键词:** 信号检测;固有时间尺度分解(ITD);经验模态分解(EMD);局域波分析;直扩信号(DSSS)

中图分类号: TN914.42

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)05-1178-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00587

## An Algorithm for Direct Sequence Spread Spectrum Signal Detection Based on Intrinsic Time-scale Decomposition

An Jin-kun<sup>①②</sup> Tian Bin<sup>①②</sup> Sun Yong-jun<sup>①</sup> Yi Ke-chu<sup>①</sup> Yu Quan<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(State Key Lab of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

<sup>②</sup>(National Laboratory of Information Control Technology for Communication System,

No.36 Research Institute of CETC, Jiaxing 314001, China)

<sup>③</sup>(Institute of China Electronics Equipment System Engineering Corporation, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Intrinsic Time-scale Decomposition(ITD) algorithm is a kind of local wave analysis algorithm. In this paper, Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) signal is decomposed by ITD and a fast algorithm for detecting the chip rate and carrier frequency of direct spread spectrum signal is proposed according to coarse search and elaborate search in frequency domain separately. This method is based on the parameter of instant amplitude, where the signal is firstly low-pass filtered by a cut-off frequency and the noise is then eliminated by an incidental frequency. High time-frequency resolution and fast calculation speed of ITD algorithm are used in this algorithm. Simulation results show that this algorithm can detect chip rate and carrier frequency effectively when SNR is of -15dB.

**Key words:** Signal detection; Intrinsic Time-scale Decomposition(ITD); Empirical Mode Decomposition(EMD); Local wave analysis; Direct Sequence Spread Spectrum signal(DSSS)

### 1 引言

直接序列扩频通信技术由于具有低的功率谱密度,宽频谱,抗干扰,抗多径,低截获概率,能实现多址通信等优点在军事通信和民用通信中获得了广泛的应用<sup>[1]</sup>。但是在通信对抗中,正是直接序列扩频信号的种种优良特性给非协作通信情况下直接序列扩频信号的检测带来了很大的挑战。为此,国内外对直接序列扩频信号的检测进行了大量的研究。Gardner 等深入研究了循环平稳理论<sup>[2,3]</sup>,杨敏军等将循环谱理论用于含有窄带调幅干扰的直扩信号参数的检测<sup>[4]</sup>,金艳等将渐进最优 $\chi^2$ 检验方法推广到

直扩信号的循环谱检测<sup>[5]</sup>。董占奇等提出基于延迟相乘-相关及谱分析的直扩信号检测算法<sup>[6]</sup>,赵知劲等提出用四阶累积量检测直扩信号参数的算法<sup>[7]</sup>。上述直扩信号检测算法都需要做大量的相关运算,计算量大,在实际应用中不利于实时计算。

Frei 等于 2006 年提出了一种新的分析非平稳信号的算法——固有时间尺度分解(ITD)<sup>[8]</sup>。和 1998 年提出并得到广泛应用的经验模态分解(EMD)<sup>[9]</sup>算法一样,该算法从本质上来说属于一种局域波分解算法<sup>[10]</sup>,适合分析具有时变谱的非平稳信号,相对于经验模式分解,固有时间尺度分解算法具有边缘效应小,不用样条插值,没有筛选过程,计算速度快,可以实时处理大量数据等优点。基于 ITD 算法的这些优点,本文采用 ITD 算法对直接序列扩频信

号分解,提出了一种利用分解后信号瞬时幅度的统计特性检测直扩信号码片速率及载波频率的快速算法。

## 2 固有时间尺度分解算法

固有时间尺度分解算法是将待分析的非平稳信号分解成一系列的固有旋转分量的和与一个单调的趋势信号,分解得到的每层固有旋转分量定义了瞬时频率,瞬时幅度等时频信息。设  $X_t$  是待分析的原信号,分解前先定义一个基线提取算子  $L$ ,使得从原始信号中去掉该基线后剩下的余量信号成为一个固有旋转。一次分解的表达式为

$$X_t = Lx_t + (1-L)x_t = L_t + H_t \quad (1)$$

其中  $L_t$  和  $H_t$  分别是基线信号(baseline signal)和固有旋转(proper rotation component)。

假定  $\{\tau_k, k=1,2,\dots\}$  是信号  $\{x_t, t>0\}$  的局部极值点,为了方便,定义  $\tau_0=0$ 。分别用  $X_k$  和  $L_k$  表示  $X(\tau_k)$  和  $L(\tau_k)$ ,假设在  $[0, \tau_k]$  上定义了  $L_t$  和  $H_t$ ,而  $X_t$  在  $[0, \tau_{k+2}]$  有定义。在连续极点间隔  $(\tau_k, \tau_{k+1})$  上定义分段线形基线提取因子  $L$ :

$$Lx_t = L_t = L_k + \left( \frac{L_{k+1} - L_k}{x_{k+1} - x_k} \right) (x_t - x_k) \quad (2)$$

其中

$$L_{k+1} = \alpha \left[ x_k + \left( \frac{\tau_{k+1} - \tau_k}{\tau_{k+2} - \tau_k} \right) (x_{k+2} - x_k) \right] + (1-\alpha)x_{k+1} \quad (3)$$

$\alpha$  是固有旋转分量幅度线性按比例提取的增益控制参数,取值范围是(0,1),通常选为 0.5。一次分解得到一个基线信号和一个固有旋转分量,后者表示信号中的局部相对高频成分。将基线信号作为新的输入信号继续分解,如此迭代直到获得一个单调信号。这样就将原信号分解成一系列瞬时频率连续递减的固有旋转分量的和与一个单调趋势。整个过程可如下表示:

$$\begin{aligned} X_t &= HX_t + LX_t = HX_t + (H+L)LX_t \\ &= (H(1+L) + L^2)X_t = \left( H \sum_{k=0}^{p-1} L^k + L^p \right) X_t \quad (4) \end{aligned}$$

每一层分解得到的是类似于正弦波的信号,可以进行单波分析快速计算得到时间-频率,时间-幅度以及时间-相位等信息以便进一步处理。

## 3 基于固有时间尺度分解的直扩信号检测算法

### 3.1 理论依据

为准确分析某个时间尺度(频率)的瞬时参量信息,需要将信号中高于某个频率的频率成分滤除后 ITD 分解,这个过程称为该频率的 ITD 分解。对 ITD

分解我们先要确定一个待分析频率作为分析的起点,称为截止频率。

将局域波理论用于直扩信号的检测,笔者认为需要解决以下两个关键问题:

(1)局域波分解后得到的时间-频率,时间-幅度等参数如何对应直扩信号的特征参数。

(2)如何分解含噪信号来分离噪声和信号,或者说如何利用分解以尽可能地减少噪声的影响。

本文通过引入伴随频率(取伴随某个截止频率的含义)解决了以上两个问题:对第 1 个问题,假设没有噪声只有直扩信号,我们选择的伴随频率比截止频率略低(保证其频率间隔与信号带宽不具有可比性)。当截止频率及其伴随频率都位于信号带内时,考虑到在码片跳变处将出现高频信号,截止频率和伴随频率分量都会变小。因此,无论是截止频率 ITD 分解后信号的瞬时幅度还是伴随频率 ITD 分解后信号的瞬时幅度在码片极性跳变处都会出现相对较小的幅度。同样地,以上两频率点处瞬时幅度的差值在码片极性跳变处也会出现较小的幅度。通过检测该幅度变化的频率就能找到码片极性跳变的频率即码片速率。因此,选择瞬时幅度作为分析对象。ITD 分解的高时间-频率分辨率保证了算法在时间域和频率域的准确性。对第 2 个问题:在低信噪比条件下,若不能确定信号的频率范围,则需要搜索。即使截止频率搜索到了信号带内,分解后瞬时幅度仍然会受噪声的影响而失真,考虑到在满足第 1 个条件的情况下,截止频率 ITD 分解和伴随频率 ITD 分解后信号的幅度特性在大量数据条件下是接近的(因为低信噪比下白噪声的影响是主要的,截止频率和伴随频率 ITD 分解后经大量统计得到的噪声对该频点幅度值的贡献是很接近的),所以截止频率 ITD 分解后信号的瞬时幅度减去伴随频率 ITD 分解后信号的瞬时幅度的差值信号就近似为信号的幅度,这样就能够减小噪声影响。

### 3.2 算法描述

解决了以上两个关键问题,本文提出了一种基于 ITD 分解的直扩信号检测算法。以下是算法描述中的几个基本概念:对截止频率 ITD 分解后的第 1 层信号称为分析信号,对伴随频率 ITD 分解后的第 1 层信号称为伴随信号。截止频率在信号带内时可以搜索到码片速率,我们将这样的搜索称为粗搜索。若要得到载波频率需要在粗搜索的基础上进行精确的搜索,我们称为细搜索。

算法流程描述如图 1 所示,具体步骤如下:

(1)选择一个截止频率  $f_1$  及其伴随频率  $f_2$ ,使  $f_2$  比  $f_1$  略低。得到分析信号  $a(t)$  和伴随信号  $c(t)$ 。

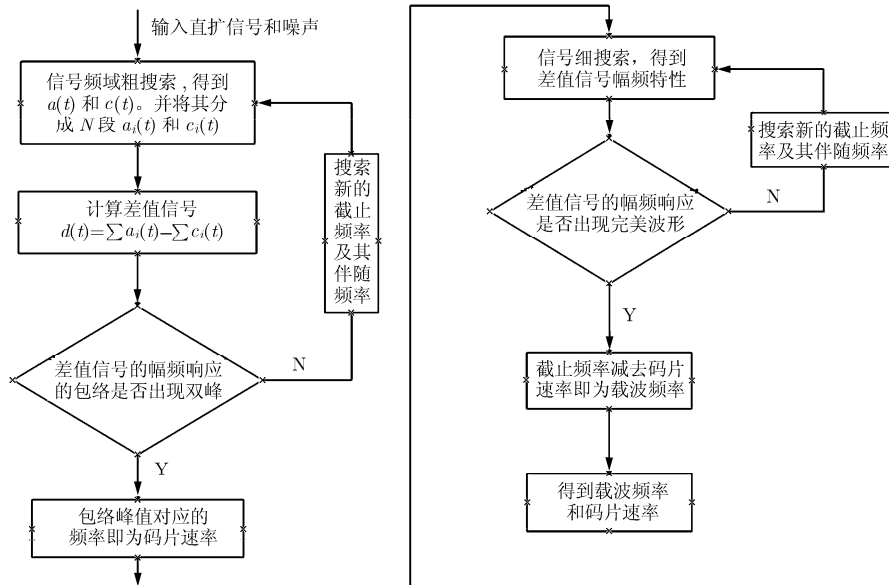


图 1 基于 ITD 的直扩信号码片速率和载波频率的检测算法

(2) 将分析信号  $a(t)$  和伴随信号  $c(t)$  分成  $N$  段, 使每段长度为伪随机码周期的整数倍, 每段表示为  $a_i(t)$  和  $c_i(t)$ 。将  $N$  段分析信号的瞬时幅度值累加和  $\sum a_i(t)$  减去  $N$  段伴随信号的瞬时幅度值累加和  $\sum c_i(t)$  以得到差值信号  $d(t) = \sum a_i(t) - \sum c_i(t)$ 。

(3) 当截止频率  $f_1$  搜索到信号带内时, 差值信号  $d(t)$  傅里叶变换后幅频特性的包络  $y(\omega)$  会出现双峰, 此时, 取其峰值对应的频率即为码片速率。否则, 差值信号  $d(t)$  的幅频特性接近于零。此步完成粗搜索, 可以得到码片速率。

(4) 在第(3)步  $y(\omega)$  出现双峰的截止频率附近细搜索, 选择伴随频率  $f_2$  比截止频率  $f_1$  低半个码片速率。首先定义差值信号  $d(t)$  幅频特性的完美图形:  
(a)  $d(t)$  幅频特性的包络  $y(\omega)$  出现完全分离的双峰;  
(b) 在所有包络  $y(\omega)$  完全分离的双峰图形中, 包络峰值最大。只有当截止频率  $f_1$  选在第 1 个过零点时差值信号  $d(t)$  的幅频特性才会出现完美图形, 且选择的截止频率高于或者低于第 1 个过零点频率的差值信号  $d(t)$  幅频特性与完美图形的差距反映在构成完美图形的两个要素上: 当截止频率略低于第 1 个过零点频率时, 包络  $y(\omega)$  不能完全分离, 但包络峰值大于完美图形的包络峰值。当截止频率略高于第 1 个过零点频率时, 包络  $y(\omega)$  可以完全分离, 但包络峰值小于完美图形的包络峰值。通过对比差值信号  $d(t)$  幅频特性与完美图形的差距可知截止频率是高于还是低于第 1 个过零点的频率, 依此可确定细搜索的方向, 得到第 1 个过零点的频率减去码片速率即为载波频率。

可见, 该算法主要是两个搜索过程。首先是确

定码片速率的粗搜索, 选择此时的伴随频率比截止频率略低, 当选定的截止频率在信号带宽内时, 通过差值信号幅频特性包络的峰值就可以得到码片速率。其次是确定载波频率的细搜索, 粗搜索已确定了信号频域存在的大致范围, 缩小了细搜索截止频率搜索的范围, 以低于截止频率一半码片速率设置其伴随频率, 根据差值信号幅频特性与完美图形的差距确定搜索的方向。我们将差值信号幅频特性包络峰值谱线与其左侧第 1 个极值点之间的距离称为观测距离。以观测距离为间隔, 在幅频特性图上从右到左取所有离散频率点, 且保证此频率点的幅度与其左右相邻频点的幅度不具有可比性(幅度是其相邻频点幅度的 3 倍以上), 则这些频点称为观测谱线。所谓谱线的分离是指直流分量谱线和单侧峰值谱线之间观测谱线的幅度值按频率由小到大呈现递增的频谱图状态, 否则, 为谱线不分离。

### 3.3 算法复杂度分析

算法的复杂度是指实现算法时所需的实数乘法次数和实数加法次数, 将本文算法的复杂度与经典的谱相关算法的复杂度做对比。其中, 谱相关算法中假设已知载频, 仅计算载频处对应的频率-循环频率曲面的切片。假设一段待处理的接收信号长度为  $n$ , 共有  $m$  段这样的数据, 每段数据平均有  $p$  个极值点, 频域平滑的窗宽为  $l$ 。则两种算法的计算复杂度分别如下:

基于谱相关算法复杂度: 首先需要傅里叶变换, 采用 FFT 算法需要  $n/2 \cdot \log_2 n$  次复数乘, 需要  $n \log_2 n$  次复数加, 其次, 在频域对数据加窗并做相关运算需要  $nl/2$  次复数乘, 再次, 对  $m$  段数据累加

需要  $m - 1$  次实数加。因此,完成该算法需要  $4 \cdot m \cdot l \cdot (n/2)^2 \cdot \log_2 n = m \cdot l \cdot n^2 \cdot \log_2 n$  次实数乘,需要  $2 \cdot (n \cdot \log_2 n) \cdot m + 3 \cdot l \cdot m \cdot (n/2)^2 \log_2 n + m - 1$  次实数加。

本文所提算法复杂度:根据式(3)计算极点的基线需要  $5 \cdot p$  次实数乘,需要  $5 \cdot p$  次实数加。根据式(2)计算各点的基线值需要  $p + n - p = n$  次实数乘,需要  $2 \cdot p + 2 \cdot (n - p) = 2 \cdot n$  次实数加,计算旋转分量需要  $n$  次实数加,再考虑算法需要对两个频点处的分解,有  $m$  段数据累加,累加后还需要做一次差值运算,因此本文所提算法共需要  $(n + 5 \cdot p) \cdot 2 \cdot m$  次实数乘,需要  $(5 \cdot p + n + n) \cdot 2 \cdot m + m - 1 + 1 = (2 \cdot n + 5 \cdot p) \cdot 2 \cdot m + m$  次实数加。

以上的两算法复杂度对比结果如表 1 所示,可以看到无论是加法运算还是乘法运算,本文所提算法的复杂度是  $O(n)$ ,而循环谱算法的复杂度是  $O(n^2 \log_2 n)$ 。因此本文所提算法比传统的谱相关算法运算更快,更有效。

表 1 本文所提算法和谱相关算法的算法复杂度对比

算法	实数加法运算次数	实数乘法运算次数
本文算法	$(2 \cdot n + 5 \cdot p) \cdot 2 \cdot m + m$	$(n + 5 \cdot p) \cdot 2 \cdot m$
谱相关算法	$2 \cdot (n \cdot \log_2 n) \cdot m + 3 \cdot l \cdot m \cdot (n/2)^2 \cdot \log_2 n + m - 1$	$m \cdot l \cdot n^2 \cdot \log_2 n$

### 4 仿真结果及分析

本文用matlab仿真软件对所提算法的准确性进行评估,仿真环境是高斯信道下检测直接序列扩频信号码片速率和载波频率。仿真参数如下:ITD分解中  $\alpha$  取 0.5, 4 PSK 调制扩频,采样率  $f_s = 1000$  Hz,码片速率 20 Hz,载波频率 50 Hz,每次处理 10 B,每个比特内有一个周期长度是 7 的 m 序列扩频伪随机码,带内信噪比是 -15 dB。重复  $N$  取 300000 次,一次处理的数据长度是 3500 抽样点,归一化的第 1 个过零点的截止频率是 0.14,信号的频率范围是

[0.06, 0.14]。

图2是粗搜索时截止频率分别在 0.12, 0.14, 0.16 时差值信号幅频特性图,伴随频率都比截止频率低 0.002(1 Hz)。各图中中间采样点 1751 对应的是直流分量。可以看到截止频率选在 0.12 和 0.14 处(带内和第 1 个过零点)信号的幅频特性包络呈现双峰值。包络峰值对应的采样点是 1821。则码片速率是:  $(1821 - 1751) \cdot f_s / 3500 = 20$  Hz。而截止频率在 0.16 时差值信号幅频特性的包络没有出现峰值。

表2是细搜索时截止频率选在第 1 个过零点频率 0.14 处附近差值信号幅频特性的包络分离情况和包络峰值幅度变化情况,相邻的截止频率点选择为 0.143, 0.142, 0.141, 0.139, 0.138, 和 0.137。伴随频率比截止频率低 0.02(10 Hz)。可以看到既满足幅频特性包络的分离特性,又满足包络的峰值最大的截止频率是 0.141。对应于实际频率是 50.5 Hz。而实际载波频率是 50 Hz。相对误差为 1%。

### 5 结论

本文将快速的 ITD 算法这种局域波分解算法引入到直扩信号参数的检测,以瞬时幅度为分析参量,在低信噪比条件下设置伴随频率减小了噪声的影

表 2 细搜索时不同截止频率差值信号幅频特性

截止频率	观测频率幅度 (按频率由小到大)(是否分离)	峰值 幅度
0.143	25750, 35740(是)	58390
0.142	27190, 36760(是)	61340
0.141	28160, 40200(是)	64990
0.140	17290, 33180, 42210(是)	63420
0.139	24280, 22370, 20990, 32710, 45040(否)	65740
0.138	31150, 25120, 21800, 34280, 44510(否)	68530
0.137	41290, 31040, 20730, 24330, 37930, 45920(否)	70900

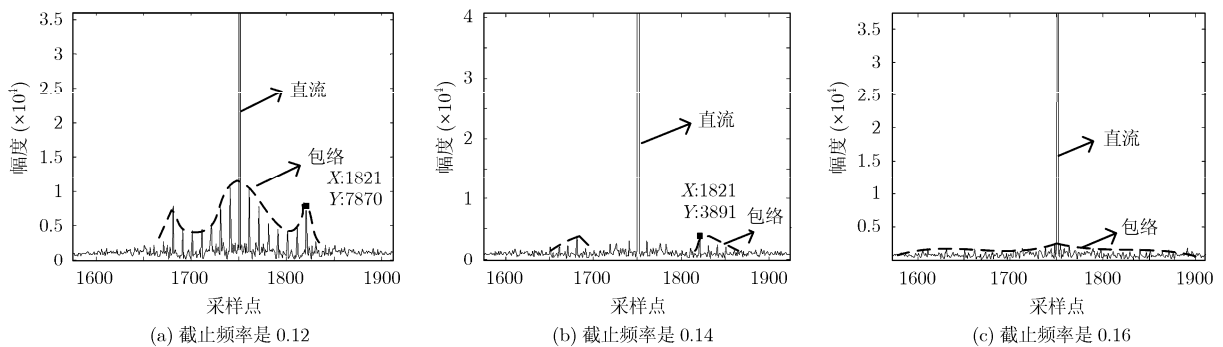


图2 粗搜索时不同截止频率对应差值信号幅频特性图

响,通过粗搜索得到码片速率,通过细搜索得到载频。若已知信号频带范围则会减少搜索时间,仿真结果显示在低信噪比下能够有效地检测出直扩信号的码片速率和载波频率,该算法相对于传统的直扩信号检测算法具有计算简单,运算速度快,易于实现实时计算的优点。

### 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,2004:3-20.
- [2] Gardner W A. Spectral correlation of modulated signals: Part II digital modulation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1987, 35(6): 595-601.
- [3] Gardner W A. Measurement of spectrum correlation[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1986, 34(5): 1111-1123.
- [4] 杨敏军,邱玲. 一种直扩信号的检测方法[J]. *计算机仿真*, 2007, 24(9): 322-324.  
Yang Min-jun and Qiu Ling. A method of DS signal detection[J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(9): 322-324.
- [5] 金艳,姬红兵,罗军辉. 一种基于循环统计量的直扩信号检测与参数估计方法[J]. *电子学报*, 2006, 34(4): 634-637.  
Jin Yan, Ji Hong-bing, and Luo Jun-hui. A cyclic-cumulant based method for DS-SS signal detection and parameter estimation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(4): 634-637.
- [6] 董占奇,胡捍英,于宏毅. 基于延迟相乘-相关及谱分析的直扩信号检测与符号周期、码片时宽估计分析[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(4): 840-842.  
Dong Zhan-qi, Hu Han-ying, and Yu Hong-yi. The detection, symbol period and chip width estimation of DSSS signals based on delay-multiply, correlation and spectrum analysis [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2008, 30(4): 840-842.
- [7] 赵知劲, 邬佳, 徐春云等. 基于四阶累积量的 DSSS/QPSK 信号检测方法研究[J]. *电子学报*, 2007, 35(6): 1046-1049.  
Zhao Zhi-jin, Wu Jia, Xu Chun-yun, et al. The study on the detection methods of DSSS/QPSK signal based on the fourth-order cumulants.[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(6): 1046-1049.
- [8] Frei M G and Osorio I. Intrinsic time-scale decomposition: time-frequency-energy analysis and real-time filtering of non-stationary signals[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 2006, 463(2078): 321-342.
- [9] Huang N E, Shen Z, and Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [10] 张海勇. 一种新的非平稳信号分析方法——局域波分析[J]. *电子与信息学报*, 2003, 10(25): 1327-1333.  
Zhang Hai-yong. A new method for analyzing nonstationary signal——local wave analysis[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2003, 25(10): 1327-1333.
- 安金坤: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为非平稳信号处理、通信信号的检测与参数估计.
- 田 斌: 男, 1970年生, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为通信信号处理、卫星通信.
- 孙永军: 男, 1974年生, 博士, 研究方向为通信抗干扰、通信信号处理.
- 易克初: 男, 1943年生, 博士, 教授, 博士生导师, 综合业务网国家重点实验室副主任, 主要研究方向为通信信号处理、卫星通信.
- 于 全: 男, 1965年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 通信研究中心主任, 研究方向为自组织网络技术、无线通信网络规划与设计、软件无线电.