

基于分数阶相关的无源雷达动目标检测方法

赵兴浩, 陶 然

(北京理工大学电子工程系, 北京 100081)

摘 要: 本文将分数阶相关引入到互模糊函数的计算中, 提出了一种基于分数阶相关的无源雷达动目标检测方法. 与基于 FFT 计算互模糊函数的方法相比, 采用这种方法的优点是在检测目标时可以只扫描某个环形扇区而不用计算整个模糊平面, 减小了计算量; 另外, 由于在计算互模糊函数时极角和极径的取样间隔可以任意选择, 突破了时域采样间隔的限制, 可在时延和频移上均得到高精度估计. 最后通过仿真实例验证了该方法的有效性.

关键词: 分数阶相关; 互模糊函数; 无源雷达; 动目标检测

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 09 1567-04

A New Method for Passive Radar MTD Based on the Fractional Correlation

ZHAO Xing hao, TAO Ran

(Dept. of Electronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A new method for passive radar MTD based on fractional correlation is presented by introducing the fractional correlation into the computation of the cross ambiguity function (CAF). Compared with the FFT based computation to CAF, the presented method can scan the target only in certain circular sector instead of the whole ambiguity plane, which may decrease the computational load. In addition, since sampling interval of both the angle and the radial can be chosen arbitrarily in the computation of the CAF, it removes the restriction of original time interval, and may provide the accurate estimation in both time delay and Doppler shift. Finally, the method is also verified by the simulation examples.

Key words: fractional correlation; cross ambiguity function; passive radar; MTD

1 引言

近年来,随着电子战的愈演愈烈,利用外辐射源的无源雷达探测技术由于具有隐蔽性好,生存能力强,反隐身等特点而日益成为各国的研究重点.这种雷达自身不发射信号,而是将环境当中的电视、广播、通信等信号作为机会照射源来探测目标.根据信号处理的相参性,目前外辐射源雷达主要采用两种体制:(1)相参体制.大部分外辐射源雷达都采用这种体制,其系统组成包含两个接收通道,一个天线对准照射源,接收直达波信号,另一个天线对准目标空域,接收目标散射回波信号,然后以直达波为参考信号与目标回波进行微弱目标相干检测,估计出目标反射信号的波达方向、多普勒频移以及反射信号与直达信号的时延等参数,对目标进行定位和跟踪^[1,2];(2)非相参体制.这种体制不需要参考信号,只采集回波信号进行FFT处理获得多普勒频移,采用干涉仪原理获得目标方位信息,然后利用目标多普勒和方位信息进行匹配定位^[3].本文的目标检测方法主要针对相参体制.

由于运动目标回波相对于直达波不仅有时延,而且还有多普勒频移,为了充分利用其多普勒信息提高检测能力,同时估计出目标的时延和多普勒频移参数,通常采用基于互模糊

函数(Cross Ambiguity Function, CAF)的动目标检测及时延-频移联合估计算法^[4].它通过计算直达信号和回波信号的互模糊函数,然后在时延-频移平面上按阈值进行峰值点的二维搜索即可实现动目标检测和参数估计.CAF算法的关键是要计算出直达波与回波信号的互模糊函数.传统的方法是通过FFT来实现互模糊函数的离散计算,即先对两个信号的离散序列求瞬时相关,然后对每个相关序列求FFT,从而得到离散互模糊函数.所得到的离散结果相当于互模糊函数在时延-频移平面直角坐标网格上的取样值.由于目标回波信号极其微弱,需要较长的相关积累时间,导致运用上述基于FFT计算互模糊函数的方法运算量极大,而且由于时域采样间隔的限制,它很难同时提高时延和频移的估计精度,为此需要研究其他更加灵活有效的互模糊函数计算方法.

本文利用分数阶相关与模糊函数的关系,将分数阶相关引入到极坐标表示的互模糊函数的计算中,从而提出了一种基于分数阶相关的无源雷达动目标检测方法.采用这种方法的优点是在检测目标时可以只扫描某个环形扇区而不用计算整个时延-频移平面,减小了计算量;另外,由于在计算极坐标表示的互模糊函数时极角和极径方向的取样间隔可以任意选择,与基于FFT的计算方法相比,它突破了时域采样间隔的

限制,可同时得到时延和频移的高精度估计.

2 分数阶相关与模糊函数的关系

分数阶傅立叶变换(FRFT)是传统傅立叶变换的一种扩展,是一种广义的傅立叶变换^[5].分数阶傅立叶变换对信号的作用可以看成是在时频平面里“旋转” ϕ 角度,当 $\phi = \pi/2$,

即从时间轴转到频率轴时,它就是标准傅立叶变换,当 $\phi \neq \pi/2$ 的整数倍时,称为分数阶傅立叶变换,所对应的与时间轴夹角为 ϕ 的变量轴称为 ϕ 分数阶域.类似地,分数阶相关属于普通相关的推广,普通相关原来只是局限于时域或频域,随着分数阶傅立叶变换的出现,人们将相关运算推广到任意分数阶域.两个信号的分数阶相关运算是指将两个时域信号通过分数阶傅立叶变换变到某一分数阶域,然后在该域上作普通相关运算,最后将运算结果再变回到时域上.文献[6]通过引入一个分数移算子 R_{ϕ}^{δ} 导出了一种分数阶相关的数学表达式:

$$(r \odot_{\phi s})(\rho) = \langle r, R_{\phi}^{\delta} s \rangle = \exp(j2\pi(\rho^2/2)\cos\phi\sin\phi) \int r(t) s^*(t - \rho\cos\phi) \exp(-j2\pi t \rho \sin\phi) dt \quad (1)$$

其中,分数移算子 R_{ϕ}^{δ} 定义为

$$(R_{\phi}^{\delta}(t)) = s(t - \rho\cos\phi) \exp(-j2\pi(\rho^2/2)\cos\phi\sin\phi) + j2\pi t \rho \sin\phi \quad (2)$$

从公式(1)和(2)可以看出,分数移算子 R_{ϕ}^{δ} 对信号的作用效果既有时移分量 $\rho\cos\phi$,又有频移分量 $\rho\sin\phi$,可见分数阶相关属于一种时延-频移二维相关,它必然与两个信号的模糊函数之间存在对应关系.为了将分数阶相关公式(1)变成对称形式,令 $t = t' + (\rho/2)\cos\phi$,作变量替换可得

$$(r \odot_{\phi s})(\rho) = \int r(t' + (\rho/2)\cos\phi) s^*(t' - (\rho/2)\cos\phi) \exp(-j\pi t' \rho \sin\phi) dt' \quad (3)$$

两个信号模糊函数的对称形式定义为

$$M_{rs}(\tau, \nu) = \int r(t + \tau/2) s^*(t - \tau/2) \exp(-j2\pi \nu t) dt \quad (4)$$

将公式(3)和(4)进行比较,于是建立了两个信号的分数阶相关与模糊函数之间的关系

$$(r \odot_{\phi s})(\rho) = M_{rs}(\rho\cos\phi, \rho\sin\phi) \quad (5)$$

这个公式表明,两个信号的 ϕ 域分数阶相关就等于其模糊函数在 ϕ 角射线方向的径向切片,如图1所示.

3 基于分数阶相关的无源雷达动目标检测方法

3.1 基本原理

无源雷达动目标检测需要计算直达波和目标回波两个信

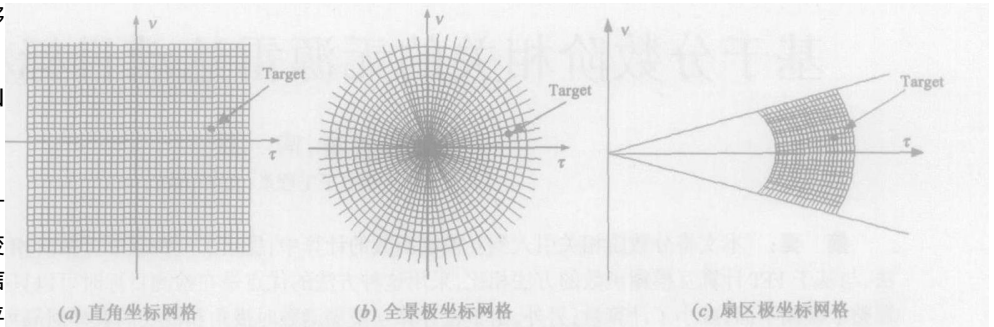


图2 时延-频移平面计算网格示意图

号的互模糊函数.从数学角度来讲,互模糊函数可以有直角坐标的表示形式 $M_{rs}(\tau, \nu)$,也可以有极坐标的表示形式 $P_{rs}(\rho, \phi)$.传统的计算方法都是利用瞬时域相关和FFT以如图2(a)所示的直角坐标网格形式计算互模糊函数 $M_{rs}(\tau, \nu)$,那么很自然地要问,能否以极坐标的形式来计算互模糊函数 $P_{rs}(\rho, \phi)$ 呢?从上节知道,两个信号的 ϕ 域分数阶相关就等于其模糊函数在 ϕ 角射线方向的径向切片.利用这一特性,我们可以将分数阶相关引入到极坐标表示的互模糊函数 $P_{rs}(\rho, \phi)$ 的计算中,从而建立了一种新的无源雷达动目标检测的计算方法.其基本思路是以旋转角 ϕ 为变量,分别计算在每个角度 $\phi \in (0, 2\pi)$ 上的直达波和目标回波信号的分数阶相关 $(s \odot_{\phi} r)(\rho)$,从而得到两个信号的以极坐标形式表示的互模糊函数 $P_{rs}(\rho, \phi)$,然后在模糊平面的以极径 ρ 和极角 ϕ 为变量所组成的极坐标系中按阈值进行峰值点的二维搜索,即可实现动目标的检测.在实际计算中,需要对极径 ρ 和极角 ϕ 作离散化,因此是在如图2(b)所示的极坐标网格上计算互模糊函数.

由于实际运动目标的多普勒频移一般不会超过 ± 20 kHz,与采样频率相比很低,并且回波信号相对直达波都会有一段时延,则目标峰值在时延-频移平面中的位置应该主要在第一、四象限靠近时延轴的区域.对于无源雷达动目标检测,为了减小计算量,我们并不需要扫描如图2(b)的整个圆周,而只要求扫描如图2(c)所示的包含目标峰值的一小段环形扇区,并且要求其中的网格密度可以调节,因此我们根据需要先选定环形扇区的角度区间 (ϕ_i, ϕ_j) 和极径区间 (ρ_i, ρ_j) ,然后综合考虑分辨率和计算量,确定角度 ϕ 和极径 ρ 的采样间隔,之后就可以在角度 (ϕ_i, ϕ_j) 区间上的每个角度取样值上计算互模糊函数切片在极径区间 (ρ_i, ρ_j) 上的取样值.

3.2 分数阶相关的快速离散计算方法

上述目标检测方法实现的关键是要能够快速计算互模糊函数径向切片(分数阶相关)上任意区间段上的任意点数采样值,为此需要用到一系列信号处理算法,包括分数阶相关的快速算法,分数阶傅立叶变换(FRFT)的快速算法以及Chirp Z变换(CZT)算法.具体说明如下:

(1)在计算 ϕ 域分数阶相关时,若先对信号求转角为 ϕ 的分数阶傅立叶变换,再在 ϕ 域内作普通相关运算比较耗时.分数阶相关快速算法利用了傅立叶变换的时域卷积定理将相关运算转换为乘积运算.这种计算方法首先对两个信号求转角为 $\phi + \pi/2$ 的分数阶傅立叶变换,然后求它们的共轭乘

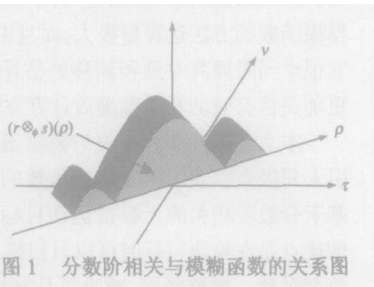


图1 分数阶相关与模糊函数的关系图

积,再求傅立叶逆变换.可用公式表示为

$$(r \circledast_{\phi_s})(\rho) = (R^{\phi} \circledast_0 S^{\phi})(\rho) = \int R^{\pi/2+\phi}(u) [S^{\pi/2+\phi}(u)]^* e^{j2\pi u \rho} du \quad (6)$$

(2)上式是连续表达式,实际计算必须要离散化.本文在计算信号的分数阶傅立叶变换(FRFT)时采用了文献[7]提出的快速数值计算方法.该算法要求在计算之前必须先对原始信号进行量纲归一化处理,有关内容详见文献[7].设原始信号的采样点数为 N ,对直达波 $s(t)$ 和回波信号 $r(t)$ 分别计算得到它们的FRFT的 $2N$ 点采样序列 $S^{\phi+\pi/2}(k)$ 和 $R^{\phi+\pi/2}(k)$, $-N \leq k \leq N-1$,并代入到式(6)得到

$$(s \circledast_{\phi})(\rho) = \frac{1}{2\Delta x} \sum_{k=-N}^{N-1} R^{\pi/2+\phi} \left(\frac{k}{2\Delta x} \right) [S^{\pi/2+\phi} \left(\frac{k}{2\Delta x} \right)]^* e^{j\frac{\pi k \rho}{\Delta x}}, \quad -\Delta x \leq \rho < \Delta x \quad (7)$$

其中 $N = \Delta x^2$, Δx 为信号的量纲归一化宽度.为了得到分数阶相关 $(r \circledast_{\phi_s})(\rho)$ 在区间 $[-\Delta x, \Delta x]$ 上的 $2N$ 点等间隔样本,令 $\rho = m/\Delta x$ 并代入式(7)得到

$$(s \circledast_{\phi}) \left(\frac{m}{\Delta x} \right) = \frac{1}{2\Delta x} \sum_{k=-N}^{N-1} R^{\pi/2+\phi} \left(\frac{k}{2\Delta x} \right) [S^{\pi/2+\phi} \left(\frac{k}{2\Delta x} \right)]^* e^{j\frac{\pi k m}{N}}, \quad -N \leq m \leq N-1 \quad (8)$$

上式右端实际上为序列的 $2N$ 点离散傅立叶逆变换(IDFT)表达式,因此分数阶相关可以通过FFT计算出来.至此,我们就求出了互模糊函数径向切片(分数阶相关)的以原点为中心,线段 $[-\Delta x, \Delta x]$ 上(如图2(b)所示)的 $2N$ 点均匀取样序列.

(3)上面利用FFT的方法只能计算出分数阶相关在全长线段 $[-\Delta x, \Delta x]$ 的 $2N$ 点取样序列,由于取样范围和点数被固定而缺乏灵活性.若要在如图2(c)所示的环形扇区计算互模糊函数并且网格密度可调节,则必须找到快速计算互模糊函数径向切片(分数阶相关)在任意线段 $[\rho_i, \rho_j] \in [-\Delta x, \Delta x]$ 上的任意点数 M 均匀取样序列的方法.为了得到分数阶相关 $(r \circledast_{\phi_s})(\rho)$ 在区间 $[\rho_i, \rho_j]$ 上的 M 点等间隔样本,设 $\rho = \rho_i + m\Delta\rho$, $0 \leq m \leq M-1$, $\Delta\rho = (\rho_j - \rho_i)/(M-1)$,并将其代入到公式(7)中得到

$$(s \circledast_{\phi})(\rho_i + m\Delta\rho) = \frac{1}{2\Delta x} \sum_{k=-N}^{N-1} R^{\pi/2+\phi} \left(\frac{k}{2\Delta x} \right) [S^{\pi/2+\phi} \left(\frac{k}{2\Delta x} \right)]^* e^{j\pi \frac{\rho_i}{\Delta x} k} e^{j\pi \frac{\Delta\rho}{\Delta x} m} \quad (9)$$

若定义

$$g(k) = \frac{1}{2\Delta x} R^{\pi/2+\phi} \left(\frac{k}{2\Delta x} \right) [S^{\pi/2+\phi} \left(\frac{k}{2\Delta x} \right)]^* e^{j\pi \frac{\rho_i}{\Delta x} k} \quad (10)$$

$$W = e^{j\pi(\Delta\rho/\Delta x)} \quad (11)$$

则式(9)可改写为

$$(s \circledast_{\phi})(\rho_i + m\Delta\rho) = \sum_{k=-N}^{N-1} g(k) W^{km}, \quad 0 \leq m \leq M-1 \quad (12)$$

再利用等式 $km = \frac{1}{2}[k^2 + m^2 - (m-k)^2]$ 将式(12)改写为

$$(s \circledast_{\phi})(\rho_i + m\Delta\rho) = W^{m^2/2} \sum_{k=-N}^{N-1} (g(k) W^{k^2/2}) W^{-(m-k)^2/2}, \quad 0 \leq m \leq M-1 \quad (13)$$

上式表明,分数阶相关样本 $(s \circledast_{\phi})(\rho_i + m\Delta\rho)$ 可以通过求 $g(k) W^{k^2/2}$ 与 $W^{k^2/2}$ 的离散卷积,并乘上 $W^{m^2/2}$ 得到,而离散卷积可用FFT的方法快速求得.由于需要和一个Chirp信号 $W^{k^2/2}$ 作卷积,因此称这种快速算法为Chirp Z变换(CZT)算法.利用CZT算法求分数阶相关与FFT方法相比具有很大的灵活性.FFT方法只能在整体区间 $[-\Delta x, \Delta x]$ 上采样,采样点数固定为输入序列的点数 $2N$,采样间隔也固定为 $\Delta x/N$;而CZT算法可根据需要在局部区间 $[\rho_i, \rho_j]$ 上采样,采样点数 M 也可根据分辨率 $\Delta\rho$ 的要求选取.至此,我们就求出了互模糊函数径向切片的任意线段 $[\rho_i, \rho_j]$ 上(如图2(c)所示)的 M 点均匀取样序列.

4 仿真实例及分析

可以利用的外辐射源信号形式多样,本文以作者研究较多的一种外辐射源——GSM基站发射信号为例进行分析,一般GSM信号为带宽 $B = 200\text{kHz}$ 的等幅窄带GMSK调制信号.若对GSM基带信号的采样频率 $f_s = 500\text{kHz}$,观测时间 $T = 4\text{ms}$,则可得到 $N = 2000$ 点的观测样本.设目标回波相对于直达波的时延(到达时间差) $\tau = 0.2\text{ms}$,目标运动所产生的多普勒频移 $f_d = 5\text{kHz}$.假定雷达接收机的直达波通道中的信号为忽略噪声和多径干扰的纯净直达信号,而目标回波通道中只有目标回波信号和白噪声,直达波干扰分量已经通过自适应对消技术被抑制掉^[8].在进行仿真时,首先对极角以 $\Delta\phi = 0.5^\circ$ 为间隔采样,求以极坐标表示的互模糊函数的全景扫描图,如图3所示.图3(a)是忽略了回波信道中的噪声而只对目标回波信号与直达信号做互模糊函数的仿真结果.图3(b)是在回波信道中的信噪比 $\text{SNR} = -20\text{dB}$ 时,回波信号与直达波做互模糊函数的仿真结果.为了观察互模糊函数的处理增益,将纵坐标以分贝刻度表示.按照相关处理增益的计算方

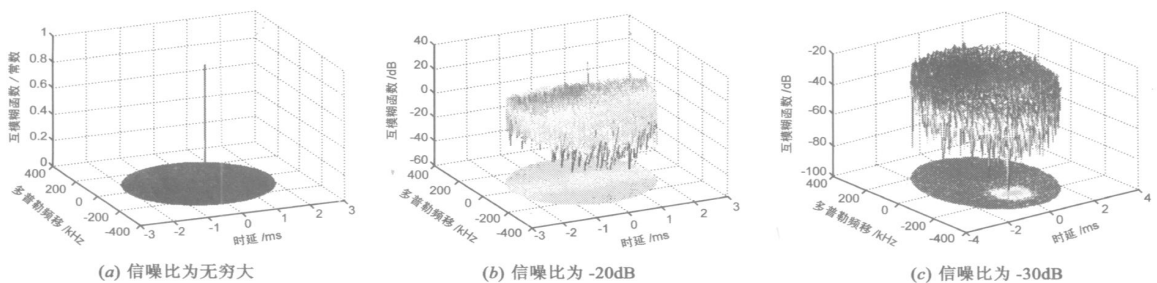


图3 以极坐标表示的互模糊

法,观测信号的时宽 $T = 4\text{ms}$, 带宽为 $B = 200\text{kHz}$, 则互模糊函数的处理增益为 $BT = 29\text{dB}$. 这样,当目标信号比噪声低 20dB 时,从互模糊函数处理获得的增益使得经处理后目标信号将比噪声高出 9dB 左右,足以发现目标;但是,当目标信号比噪声低 30dB 时,由于目标信号太弱,即使加上 29dB 的处理增益,目标信号仍然被埋在噪声之中而无法检测,图 3(b) 和 (c) 分别仿真说明了这两种情况.

为了减小计算量,我们没有必要计算互模糊函数的全幅图,而只需在可能包含目标的某个小的环形扇区内进行扫描计算即可. 根据上面仿真中目标峰值在模糊平面内的极径和极角位置,我们可以选定一个包含目标的小环形扇区,它的角度区间和极径区间分别设为 $[9^\circ, 18^\circ]$ 和 $[0.1\text{ms}, 0.4\text{ms}]$ (以时延轴为参考). 为了分析极径和极角的取样间隔对检测效果的影响,我们可分别对两组不同的间隔取值进行仿真,第一组为 $\Delta\phi = 0.45^\circ, \Delta\rho = 0.2\mu\text{s}$; 第二组为 $\Delta\phi = 1^\circ, \Delta\rho = 0.2\mu\text{s}$. 当回波信道中的信噪比为 $\text{SNR} = -20\text{dB}$ 时,得到如下的仿真结果.

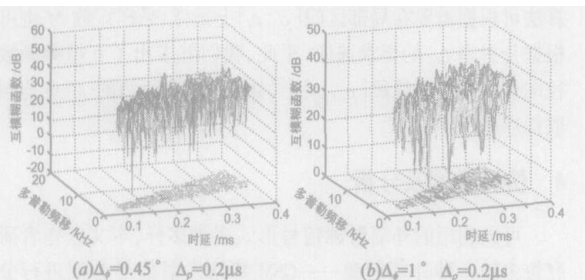


图 4 以极坐标表示的互模糊函数环形扇区扫描图

从仿真结果可以发现,取样间隔对目标检测有很大影响,图 4(a) 以 $\Delta\phi = 0.45^\circ$ 的角间隔扫描时可清晰地发现目标;而图 4(b) 以 $\Delta\phi = 1^\circ$ 的角间隔扫描时却丢失了目标. 这主要是因为目标在模糊平面上呈现为在相应时延和频移处的一个很细的针状尖峰,因此扫描间隔要能保证径向切片能够切到目标的尖峰范围内,若间隔过大则有可能因目标峰值落在两个相邻的切片之间而导致目标丢失. 另外,通过极坐标的几何关系可以知道,角间隔的选取与目标到原点的距离有密切关系,目标距原点越远,角间隔要求越小. 当然,在满足检测要求的条件下,角间隔应尽可能的大一些,因为角间隔的减小将导致运算量的成倍增加.

5 结束语

本文对基于被动相干定位体制的无源雷达的动目标检测技术进行了深入研究. 针对普通互模糊函数检测算法的运算量大,无法实现时延和频移同时高精度估计的问题,本文根据分数阶相关与模糊函数的关系,将分数阶相关引入到互模糊函数的计算中,从而提出了以极坐标方式计算互模糊函数的无源雷达动目标检测方法. 采用这种方法的优点是在检测目标时不必在整个模糊平面上计算模糊函数,只根据需

扫描某个环形扇区,从而减小计算量;同时,由于在利用极坐标计算互模糊函数时极角和极径的采样间隔可以任意选取,可实现时延和多普勒频移的同时高精度估计. 最后以 GSM 信号为例进行了仿真,仿真结果证明这种算法的有效性和实用价值.

参考文献:

- [1] Sahr J D, Lind F D. The Manastash ridge radar: A passive bistatic radar for upper atmosphere radio science[J]. Radio Science, 1997, 32(6): 2345-2358.
- [2] B D Nordwall. Silent Sentry a new type of radar[J]. Aviation Week & Space Technology (New York), 1998, 149(22): 70-71.
- [3] Howland P E. Passive tracking of airborne targets using only Doppler and DOA information[A]. IEE Computing and Control Division Colloquium on Algorithms for Target Tracking[C]. Savoy Place, London UK: IEE, 1995. 37-39.
- [4] Stein S. Differential delay/Doppler ML estimation with unknown signal[J]. IEEE Trans on ASSP, 1993, 41(8): 2717-2719.
- [5] L B Almeida. The fractional Fourier transform and time frequency representations[J]. IEEE Trans on SP, 1994, 42(11): 3084-3091.
- [6] O Okay, et al. Fractional convolution and correlation via operator method and an application to detection of linear FM signals[J]. IEEE Trans on SP, 2001, 49(5): 979-993.
- [7] Ozaktas H M, et al. Digital computation of the fractional Fourier transform[J]. IEEE Trans on SP, 1996, 44(9): 2141-2150.
- [8] Xu Y J, et al. Using LMS adaptive filter in direct wave cancellation[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2003, 12(4): 425-427.

作者简介:



赵兴浩 男, 1969 年 10 月出生于河北石家庄, 1991 年毕业于华中理工大学, 获学士学位, 1999 年考入北京理工大学电子工程系攻读硕士及博士学位, 现为北京理工大学电子工程系博士研究生, 感兴趣的方向为雷达信号处理、分数阶傅立叶变换和数字水印, 国内外发表论文十余篇. E-mail: zhaoxinghao03@bit.edu.cn.



陶然 男, 1964 年 11 月出生于安徽南陵, 现任北京理工大学电子工程系副主任、信息安全与对抗中心主任、教授、博士生导师. 研究方向为新型探测理论与技术、宽带无线移动通信理论及应用、信息安全与对抗, 获“国家高校青年教师奖”及部级二等奖 1 项, 部级三等奖 4 项, 已发表论文 100 余篇, 被三大检索收录近 80 篇, 出版著作 4 部, 主持包括国家自然科学基金重点项目、总装备部重点预研项目、国防科工委重点预研项目共 10 余项. E-mail: rantao@bit.edu.cn.