

DTV 广播信号的微多普勒检测与估计

蔡苗红 何峰 吴乐南

(东南大学信息科学与工程学院, 南京 210096)

摘要 基于多径信道传播特征,分析了移动接收机相对于远端数字电视(DTV)发射台以非匀速运动时所引起的微多普勒效应。为了准确分离与提取 DTV 接收信号中多个信号分量的微多普勒值,提出了支持向量聚类算法,对接收信号的分数阶傅里叶变换结果进行聚类分析,实现多个微多普勒分量的同步检测与准确估计。仿真结果表明,该方法能从噪声中分离、提取与估计源于 DTV 单频网各个发射台、不同路径的多个信号分量的微多普勒值,具有较好的实用性。

关键词 微多普勒 数字电视 分数阶傅里叶变换 支持向量聚类

中图分类号:TN911.7 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)10-1967-04

Micro-doppler Detection and Estimation Based on DTV Broadcasting Signals

CAI Miao-hong, He Feng, WU Le-nan

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract Micro-doppler effect induced by non-uniform motion of mobile receiver via faraway DTV transmit station was analyzed based on multipath channel propagation characteristics. To accurately separate and extract micro-Doppler values of multiple signal components in DTV received signals, the support vector clustering (SVC) algorithm was applied. By using FRFT transform results of the received signal, clustering analysis was conducted, and synchronous detection and accurate estimation of multiple micro-doppler components was realized. The simulation results showed that the method proposed can separate, extract and estimate micro-doppler values of multiple signal components from different paths and different DTV transmit stations under single frequency network.

Keywords micro-doppler, DTV, FRFT, SVC (support vector clustering)

1 引言

目标或目标组成部分的微动将对雷达回波的频谱产生调制,Chen Victor C 等人将其称为微多普勒现象,研究了微波雷达振动和转动点目标对单频信号微多普勒效应的数学原理^[1]。文献[2]、[3]研究了逆合成孔径雷达(ISAR)雷达目标运动部分(如直升机旋翼、坦克炮塔)的微多普勒特征识别和信号分离。这些应用都限于雷达系统对目标特征的识别,且信号模型都基于单频发射信号和单径传播信道而建立。

与雷达系统不同,数字电视(DTV)系统是基于

多载波正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)调制的,其信道传输的多径传播特征通常更为明显。对于 DTV 定位系统,当移动用户接收机(移动台)相对远端 DTV 发射台存在径向非匀速运动分量时,同样会在接收信号里产生微多普勒调制。此时接收信号的变化,一方面来自接收机的移动,另一方面则可能受多径传播的影响。其中移动台运动信息包含在由运动路程差造成的接收信号相位变化值中;而多径传播环境下由于不同路径的入射波方向、路程不同,还可能引起接收信号微多普勒频移也不同。故移动台接收信号中含有其自身运动状态与环境多径影响的信息,如果提取出

它的微多普勒参数,就可望估计出用户的运动状态和其他特性,并消除或估计多径传播的影响。

为此,本文针对多径传播环境,分析了 DTV 定位系统中的微多普勒效应,并提出了一种基于分数阶傅里叶变换(RFRT)和支持向量聚类(support vector clustering, SVC)的微多普勒分离、检测与估计方法。基于 DTV 地面广播单频网(SFN)模式下有多个 DTV 发射台的情况,进行仿真实验。仿真结果表明,该方法能有效分离和提取多个分量的微多普勒参数,具有较好的实用性。

2 微多普勒效应

2.1 微多普勒模型

如图 1 所示,DTV 广播台发射点中心为 S ,其在地面的位置为 O ;在 $t_0 = 0$ 时刻地面移动台质点为 P (忽略其载体高度),质点离发射中心 S 的初始径向距离矢量为 r_0 ;以 O 为原点, OP 所在直线方向为 X 轴, OS 所在直线方向为 Z 轴,建立当地直角坐标系(X,Y,Z)。

在 $t_0 = 0$ 时刻移动台质点从 P 点出发,在 t 时刻直线运动到 P' 点:设移动台运动的距离为 $PP' = d(t)$,运动方向与电磁波直达径(LOS)入射方向夹角为 θ_0 ,与第 i 条散射径(对应散射体质点 S^i)入射方向夹角为 θ_i ;当满足 $r_0 \gg d(t)$ 且 t 足够小时,可认为在 P,P' 点处 $\theta_i (i = 0,1,\dots)$ 相同。

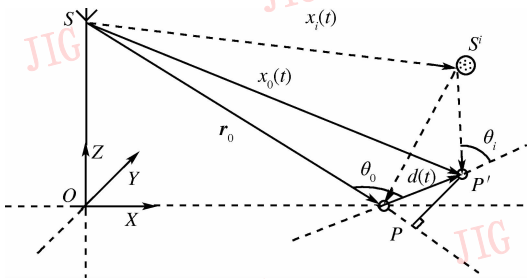


图 1 微多普勒数学模型
Fig. 1 Micro-doppler data model

设 DTV 发射载频为 f ,在第 i 条传播路径上,由于目标运动造成的接收信号相位变化为

$$\Delta\varphi(t)_i = \frac{2\pi\Delta x_i(t)}{\lambda} = \frac{2\pi d(t)\cos\theta_i}{\lambda} = \frac{2\pi f d(t)\cos\theta_i}{c} \quad (1)$$

式中, c 和 $\lambda = c/f$ 分别为电磁波传播速度和波长, $\Delta x_i(t)$ 为目标运动的路程差, $d(t)$ 为目标质点的非匀速直线运动距离。

$$d(t) = vt + at^2/2 + O(t^3)$$

v 和 a 分别为目标运动的速度和加速度, $O(\cdot)$

表示变量趋于 0 时的同阶无穷小量。则目标运动引起的微多普勒为

$$f_{\text{micro-D}}[i] = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Delta\varphi(t)_i}{dt} = \frac{f}{c}(v + at + O(t^2))\cos\theta_i \quad (2)$$

令 $f_{di} = \frac{vf}{c}\cos\theta_i$, $\mu_{di} = \frac{2af}{c}\cos\theta_i$, 则式(2)为

$$f_{\text{micro-D}}[i] = f_{di} + \frac{1}{2}\mu_{di}t + O(t^2) \quad (3)$$

f_{di}, μ_{di} 分别为在第 i 条传播路径上,目标运动速度、加速度引起的微多普勒频偏与调频率。

2.2 信号接收

DTV 发射信号可按式描述为^[4]

$$s(t) = \text{Re}\{\exp(j2\pi ft) \times [f(t) \otimes \text{Frame}(t)]\} \quad (4)$$

式中, $f(t)$ 为平方根升余弦(square root raised cosine, SRRC)滤波器的脉冲成形函数, j 表示复数, $\text{Frame}(t)$ 为组帧后的基带信号。

信号经过多径信道传输,时域的信道冲激响应(CIR)为

$$h(t, \tau) = \sum_{i=0}^{L-1} h_i(t) \exp\{j2\pi f_{\text{micro-D}}[i]t\} \delta(t - \tau_i) \quad (5)$$

其中, L 是路径总数, τ_i 为第 i 条路径的时延, $h_i(t)$ 为时延为 τ_i 第 i 路径的衰落增益。

则经信道传输到达接收机的实际信号可以表示为

$$r(t) = \text{Re}\left\{ \sum_{i=0}^{L-1} h_i(t) s(t - \tau_i) \times \exp(j2\pi f_{\text{micro-D}}[i]t) \right\} + n(t) \quad (6)$$

式中, $n(t)$ 为噪声。这里只描述了微多普勒效应对载波的影响,而没有表示其对基带信号的作用。实际上由于基带信号微多普勒值一般非常小,例如 8MHz 带宽的 DTV 基带信号^[4]在接收相对速度达到 30m/s,加速度 15m/s² 时的微多普勒频偏、调频率绝对值小于 1Hz, 1Hz/s。

3 基于 SVC 的微多普勒检测与估计

由以上分析可知,在多径传播环境下,当接收机相对于远端 DTV 发射台存在非匀速直线运动时,相应于 DTV 发射台发射载频、各路径的入射波方向不同,在接收信号里产生的微多普勒分量值不同。为

了准确分离与提取不同 DTV 发射台的多个路径信号分量的微多普勒参数值,本文引入 SVC^[5,6]算法,该算法是基于支持向量机的一种无监督、非参数型的聚类算法,无需预先给定聚类数目(发射台数量)。应用 SVC 对接收信号的 FRFT 结果进行聚类分析,以完成多个微多普勒分量的检测与估计。

3.1 SVC 基本描述

SVC 算法主要包括两部分:支持向量机的训练和聚类标识。

在训练阶段,首先使用非线性映射 ϕ 将输入样本集 $\{x_i\} \subset \mathcal{X}, i = 1, \dots, N$ 从数据空间 $\mathcal{X} \subset \mathbf{R}^n$ 非线性映射到 Hilbert 高维特征空间,在特征空间中寻找能包含所有样本映像的最小超球面半径 R :

$$\|\phi(x_i) - \mathit{sph_c}\|^2 \leq R^2 + \xi_i, \forall i, \xi_i \geq 0 \quad (7)$$

其中, $\mathit{sph_c}$ 为超球体球心, ξ_i 为松弛变量。

引入拉格朗日乘子 *Lagrange*:

$$\mathit{Lagrange} = R^2 - \sum_j (R^2 + \xi_j - \|\phi(x_j) - \mathit{sph_c}\|^2) \times \beta_j - \sum_j \xi_j \mu_j + C \sum_j \xi_j \quad (8)$$

并运用 KKT (karush-kuhn-tucker) 条件的 Wolfe 对偶形式:

$$\begin{aligned} W &= \sum_j \phi(x_j)^2 \beta_j - \sum_{i,j} \beta_i \beta_j \phi(x_i) \cdot \phi(x_j) \\ &= \sum_j K(x_j, x_j) \beta_j - \sum_{i,j} \beta_i \beta_j K(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{满足 } 0 \leq \beta_j \leq C; \sum_j \beta_j = 1; j = 1, \dots, N$$

式中, $K(x_i, x_j) = e^{-q\|x_i - x_j\|^2}$ 为高斯核函数, q 为宽度系数, C 为惩罚系数。求解以上二次型得到 $\{\beta_j\}$, R 。并由此确定支持向量 (support vectors, SVs) 和边界支持向量 (bounded support vectors, BSVs)。

然后进行聚类标识,将各样本点分配到相应的聚类中去。假定一对样本点属于不同聚类,则在 Hilbert 空间中连接它们的任意路径上必然存在点 x , 使得点 x 到超球体中心的距离大于 R , 由此可生成邻接矩阵,并通过深度优先搜索 (DFS) 算法根据邻接矩阵进行各样本点的聚类分配。

3.2 微多普勒分离、检测与估计方法

为准确分离与提取多分量的微多普勒参数,提出了一种对信号进行 FRFT 变换,再对变换结果进行聚类分析的方法。由式(3)描述的微多普勒调制类似于线性频率调制 (LFM),利用 FRFT 可以得到对应于各微多普勒值的多个尖峰。由于本文主要考虑的是微多普勒参数的分离和提取,可采用文献[7]提出的

“近似零均值法”进行时频面数据处理,仅使用信号尖峰作为 SVC 的样本输入集,从而提高算法有效性。

算法的主要步骤如下:

(1) 计算信号的 FRFT,其变换值 $F_y = FRFT(r(t))$ 。假设信号 $r(t)$ 的时宽范围限于 $[-\Delta t/2, \Delta t/2]$, 频宽范围限于 $[-\Delta f/2, \Delta f/2]$, 时带积 $N = \Delta f \Delta t$, 归一化处理后分数阶域范围 $\Delta u = \sqrt{\Delta t \Delta f}$ 。则对 $r(t)$ 作 FRFT 后,信号的微多普勒参数为

$$\begin{cases} \hat{\mu}_{di} = -\cot(\hat{p}_i \pi/2) \Delta f / \Delta t \\ \hat{f}_{di} = \hat{u}_i \csc(\hat{p}_i \pi/2) (\Delta f / \Delta t)^{1/2} \end{cases} \quad i = 1, \dots, L \quad (10)$$

式中, $(\hat{p}_i, \hat{u}_i), i = 1, \dots, L$ 为 (p, u) 平面对应各个尖峰分量的位置坐标。

(2) 确定输入样本集。使用“近似零均值法”^[7] 对 F_y 进行处理,将处理后 $F_y > 0$ 的点作为 SVC 的样本输入集: $\mathit{Samples} = \{x | x = (p, u, F_y(p, u)), F_y(p, u) > 0\}$ 。这里应注意阈值 T 的选取,一般 $T \subseteq (0, 0.01]$ 。 T 越小,去噪和减少样本输入集数量的效果越明显;但是 T 过小,可能导致有用的弱信号分量被去除。

(3) 选取适当的 q 参数和 C 参数对输入样本集 $\mathit{Samples}$ 进行 SVC 聚类训练,求得 $\{\beta_j\}, R$, 和支持向量 SVs。

(4) 对训练结果进行聚类标识,得到聚类结果。

(5) 在各个类中求取 F_y 峰值点对应的坐标 (\hat{p}_i, \hat{u}_i) , 由式(10)得到微多普勒参数估计结果。

4 仿真结果

基于 DTV 地面广播 SFN 模式下有多个 DTV 发射台的情况进行接收信号的基带仿真。实验中,假设在时间 $\Delta t = 0.5s$ 内,接收机收到来自 3 个 DTV 发射台的信号,发射台位置坐标分别为 $(0, 0)$, $(60km, 0km)$, $(60km, 60km)$ 。初始时刻移动台位置坐标 $(20km, 20km)$, 匀加速直线运动速度 $v = 30m/s$, 加速度 $a = 10m/s^2$ 。单频网 DTV 发射载频 $f_c = 1000MHz$, 采样频率 $F_s = 500Hz$ 。

图 2 所示为仿真信号的 FRFT 变换图。其中, FRFT 变换时,为计算方便,通常要求 Δu 为整数^[8]。可选取信号频宽范围 $\Delta f = 512Hz$, 归一化处理后分数阶域范围 $\Delta u = 16$ 。

图 3 所示为阈值 $T = 0.006$ 下,对信号 FRFT 结果进行时频频面“近似零均值法”处理的结果。

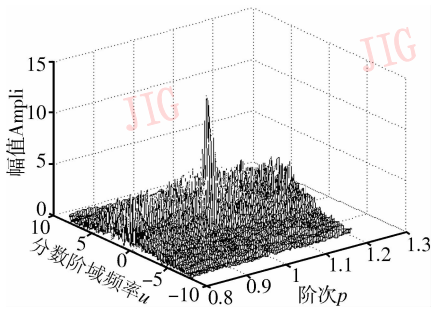


图 2 信号的 FRFT 变换结果
Fig. 2 FRFT results of signal

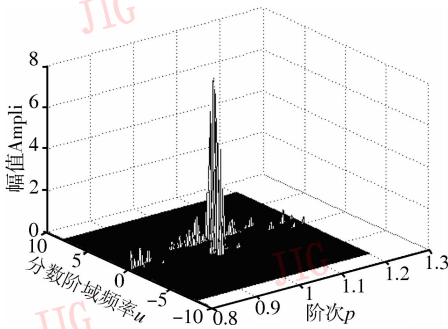


图 3 时频平面处理结果

Fig. 3 Process results of time-frequency plane

图 4 所示为选取参数 $q = 2.5, C = 1$ 情况下, 利用 SVC 算法对接收仿真信号的微多普勒聚类分析结果。聚类结果形成了 8 类, 5 个对应于来源各个发射台、不同路径的信号分量类和 3 个噪声类。实验认为样本点数少于 3 个的类以及类内峰值点的微多普勒估计值超出理论值范围的类为噪声类, 予以剔除。

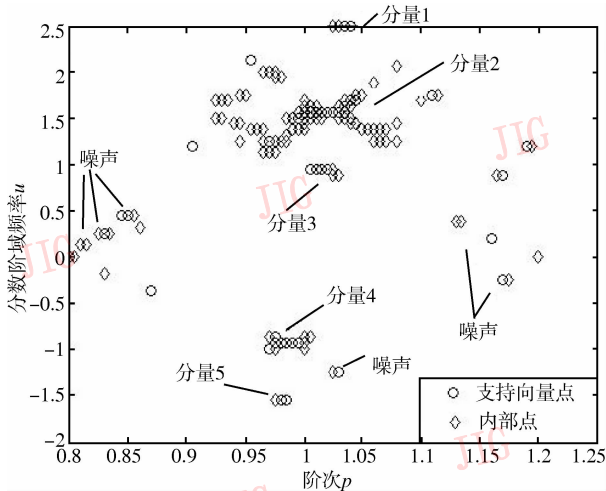


图 4 $C = 1, q = 2.5$ 时的 SVC 聚类结果

Fig. 4 SVC clustering results when $C = 1, q = 2.5$

通过求取各类中峰值点对应的坐标, 得到各信号分量的微多普勒估计结果如表 1 所示。

表 1 各信号分量的微多普勒估计结果

Tab.1 Micro-Doppler estimation results of each signal component

| 分量 | 微多普勒频偏 (Hz) | | 微多普勒调频率 (Hz/s) | |
|----|-------------|---------|----------------|---------|
| | 理想值 | 估计值 | 理想值 | 估计值 |
| 1 | 80 | 80.121 | 53.34 | 56.354 |
| 2 | 50 | 50.041 | 33.4 | 32.18 |
| 3 | 30 | 30.008 | 20.001 | 22.132 |
| 4 | -30 | -30.008 | -20.001 | -22.132 |
| 5 | -50 | -50.041 | -33.4 | -32.18 |

5 结论

本文分析了 DTV 定位系统中, 在多径传播环境下, 接收机相对远端 DTV 发射台存在非匀速直线运动时引起的微多普勒效应。主要描述了微多普勒效应对 DTV 信号载波的影响。提出了一种对信号进行 FRFT 后再对变换结果进行 SVC 聚类分析的方法, 来准确分离与提取多分量的微多普勒参数。对 DTV 地面广播单频网模式下有多个 DTV 发射台的情况进行了接收信号的基带仿真。仿真结果表明, 该方法能从噪声中同步检测源于各个发射台、不同路径的多个信号分量, 并准确估计各分量的微多普勒值。

参考文献 (References)

- Chen Victor C, Li F Y, Ho S S. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42 (1): 2 ~ 21.
- Li B, Wan J W. ISAR based on micro-doppler analysis and chirplet parameter separation[A]. In: Proceedings of 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar[C], Huangshan, Anhui, 2007: 379 ~ 384.
- Hwee Siang T, Changzheng M. ISAR imaging of targets with moving parts using micro-doppler detection on the range profile image[A]. In: Proceedings of IEEE International GeoScience and Remote Sensing Symposium[C], Barcelona, Spain, 2007: 499 ~ 502.
- Tsinghua University, Beijing Legendsilicon Ltd. Corp. DMB-TH Terrestrial Digital Multimedia Broadcasting Technology White Paper [M]. Beijing: Tsinghua University, 2006:1 ~ 123. [清华大学, 北京凌讯华业科技有限公司. DMB-TH 地面数字电视传输技术白皮书[M]. 北京: 清华大学, 2006:1 ~ 123.]
- Ben-Hur A, Horn D. Support vector clustering [J]. Journal of Machine Learning Research, 2001, 2(12): 125 ~ 137.
- Ben-Hur A, Horn D. A support vector clustering method[A]. In: Proceedings of 15th International Conference on Pattern Recognition [C], Barcelona, Spain, 2000: 724 ~ 727.
- Wang L, Ma H. Multicomponent linear FM signal detection based on support vector clustering[A]. In: Proceedings of 5th International Conference on Information, Communications and Signal Processing [C], Bangkok, Thailand, 2005: 743 ~ 747.
- Ozaktas H M, Arikan O, Kutay M A, et al. Digital Computation of the Fractional Fourier Transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(9): 2141 ~ 2150.