

数字电视外辐射源雷达目标徙动补偿新方法

王慧^① 洪丽娜^② 易建新^① 万显荣^{*①}

^①(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

^②(电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室 洛阳 471003)

摘要: 增加相参积累时间是提高数字电视外辐射源雷达探测能力的一种较为常见的技术,但当目标速度和加速度较大时,长时间相参积累会使目标回波面临距离徙动和多普勒徙动,且当外辐射源雷达信号在慢时域为非均匀采样(如中国移动多媒体广播信号)时,广泛采用的如Keystone变换和Radon-Fourier变换等徙动补偿算法已不能很好地适用。该文研究了一种基于两次短傅里叶变换的徙动补偿算法,可同时适用于非均匀和均匀采样信号,并在此基础上提出一种修正算法,修正后的该算法能检测具有更大速度和加速度的目标,同时用于均匀采样时,相对已有一些算法其运算量更小。文中首先分析了非均匀采样信号的特殊性及该特殊性带来的新困难,接着基于该特殊信号的多普勒处理阐述了徙动机理与该徙动补偿算法的基本原理。仿真和实测数据处理证明了该算法的有效性。

关键词: 外辐射源雷达; 相干积累; 徙动补偿; 两步多普勒处理; 非均匀采样

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)05-1017-06

DOI: 10.11999/JEIT141124

A Novel Migration Compensation Algorithm for Passive Radar using Digital TV Signals

Wang Hui^① Hong Li-na^② Yi Jian-xin^① Wan Xian-rong^①

^①(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

^②(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang 471003, China)

Abstract: Increasing integration time is a main approach to improve performance of passive radar, but the range and Doppler migration may occur for high-speed and accelerated targets, and for non-uniform sampled signal in the slow time such as China mobile multimedia broadcasting signal, the most used migration compensation algorithms such as Keystone transform and Radon-Fourier transform are inapplicable. This paper uses a long-time coherent integration algorithm based on two-step Doppler processing, which can be applied to both the uniform and non-uniform sampled signal, a modified algorithm based on this method is proposed, which can detect higher speed-acceleration targets, and this algorithm can improve computation efficiency. The specialty and difficulty of non-uniform sampled signal are analyzed first, then on the basis of Doppler processing of certain signal, migration reason and migration compensation principle are demonstrated. Finally, simulation and real data processing confirm the effectiveness of the proposed method.

Key words: Passive radar; Coherent integration; Migration compensation; Two-step Doppler processing; Non-uniform sampling

1 引言

外辐射源雷达自身不发射电磁波,而是利用非合作的电磁信号作为照射源,具有成本低、反隐身、生存能力强等诸多优势。随着数字电视信号逐步取代模拟电视信号,基于数字式外辐射源的被动探测

已成为近年的研究热点与前沿。因外辐射源雷达信号功率及信号带宽等均不受控,故增加相参积累时间是提高数字电视外辐射源雷达探测能力的一种较为常见的技术。但当目标速度和加速度较大时,长时间相参积累会使目标回波面临距离徙动和多普勒徙动,降低积累增益,且数字电视信号的带宽较模拟电视信号显著提高,其较高的距离分辨率更易受距离徙动的影响。因此,研究数字电视外辐射源雷达目标徙动补偿方法成为提高高速高机动目标探测能力的关键问题。

2014-08-29 收到, 2014-12-31 改回

国家自然科学基金(61331012, 61371197), 教育部博士点基金(20120141110077), CEMEE 国家实验室开放课题基金(2014K0203B)和中央高校基本科研业务费专项资金(2014212020201)资助课题

*通信作者: 万显荣 xrwan@whu.edu.cn

Keystone 变换^[1-5]和 Radon-Fourier 变换^[6-9]是两种常用的距离徙动补偿算法,这两种算法均不需要速度信息便能有效地校正距离徙动。针对多普勒徙动补偿问题,文献[10]提出通过构造二次相位补偿函数校正多普勒徙动,文献[11]提出了一种基于分数阶傅里叶变换的多普勒徙动校正算法,文献[12,13]则提出一种无需搜索加速度的 Sandglass 算法,该算法能同时完成目标检测与参数估计。当外辐射源雷达信号为均匀采样时,上述算法均能较好地对徙动进行补偿,但当信号为非均匀采样即在同一距离元慢时间采样不均匀^[14]时,上述算法运算量会显著增加。文献[14]提出了一种基于两次短傅里叶变换的徙动补偿算法,该算法无需速度信息,只需依次进行一次粗多普勒估计和一次精多普勒估计便能有效地解决非均匀与均匀采样信号的徙动问题,但该算法要求目标回波没发生多普勒模糊且目标加速度在粗多普勒估计中引起的频移可忽略,当上述要求不能满足时,该算法失效。

本文重点针对数字电视外辐射源雷达非均匀采样信号的徙动问题,在文献[14]的基础上,提出了一种修正算法,该算法能同时适用于非均匀和均匀采样信号,且修正后的该算法能用于对具有更大速度和加速度的目标检测,运算量较已有一些算法也较小,仿真和实测数据处理均证明了该算法的有效性。

2 非均匀采样问题

为便于说明慢时域非均匀采样问题,这里以中国移动多媒体广播(China Mobile Multimedia Broadcasting, CMMB)外辐射源雷达为例。CMMB 信号时域帧结构如图 1 所示, CMMB 系统定义时长 1 s 的信号为 1 帧,并将其划分为 40 个时隙,每个时隙长 25 ms,又可划分为 1 个信标和 53 个 OFDM 符号。信标持续时长(450.4 μ s)与 OFDM 数据符号时间长度(463.2 μ s)不等,导致 OFDM 数据符号在整体上存在一定的不均匀性。如文献[15]所给 CMMB 信号互模糊函数计算框架,以 OFDM 符号为处理单元划分快时间和慢时间,舍弃信标数据部分只用 OFDM 符号数据构成快时间样本,这样会导致同一距离单元慢时间采样的不均匀问题。传统在慢时域直接采用基于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的多普勒处理方式不再适用^[15],而为减小运算量,已有一些徙动补偿算法^[1-13]在慢时域均是直接采用该传统多普勒处理方式,故对非均匀采样信号而言,上述算法会因运算量的显著增加而不能很好地实现徙动补偿。

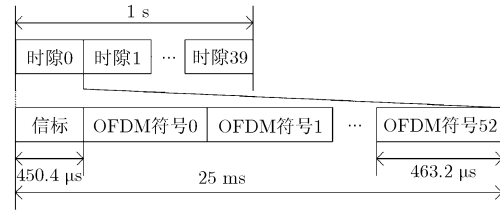


图 1 CMMB 信号帧结构

3 非均匀采样信号多普勒处理及徙动问题分析

外辐射源雷达双基地结构示意图如图 2 所示。

T_0 和 R_0 分别为发射站和接收站, L 为基线距离。设初始时刻目标位于 O 点, t 时刻运动到 O' 点, R_{T0} 和 $R_T(t)$ 分别为初始时刻和 t 时刻目标距发射站的距离, R_{r0} 和 $R_r(t)$ 分别为初始时刻和 t 时刻目标距接收站的距离, 目标做匀加速运动, 初始速度为 v_0 , 加速度为 a_0 , β_0 为初始时刻的双基地角, φ 为目标运动方向。若基带信号为 $s(t)$, t 时刻目标回波相对直达波的延时 $\tau = R(t)/c$, 多普勒频率 $f_d = -dR(t)/(\lambda dt)$, 其中, $R(t) = R_T(t) + R_r(t) - L$, c 为光速, λ 为波长。

将 $R(t)$ 在 $t = 0$ 处 Taylor 展开, 并忽略 2 次以上项, 则回波信号模型可简化为

$$\text{echo}(t) = A_e s\left(t - \left(R(0) - vt - 1/2at^2\right)/c\right) \cdot \exp\left(-j2\pi f_c \left(R(0) - vt - 1/2at^2\right)/c\right) \quad (1)$$

其中 f_c 为载波频率, A_e 为回波信号幅度。

$$R(0) = R_{T0} + R_{r0} - L \quad (2)$$

$$v = 2v_0 \cos\left(\varphi + \frac{\beta_0}{2}\right) \cos \frac{\beta_0}{2} \quad (3)$$

$$a = -\frac{v_0^2 \sin^2(\varphi + \beta_0)}{R_{T0}} - \frac{v_0^2 \sin^2(\beta_0)}{R_{r0}} + 2a_0 \cos\left(\varphi + \frac{\beta_0}{2}\right) \cos \frac{\beta_0}{2} \quad (4)$$

为方便阐述, 全文目标速度和加速度分别指这里的速度 v 和加速度 a 。

对式(1)进行 2 维分时处理, 设快时间为 t_f , 慢时间为 t_m , 当等效脉冲时长很短, 如 CMMB 信号

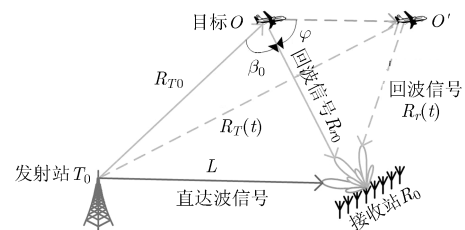


图 2 外辐射源雷达双基地结构示意图

中等效脉冲时长为一个 OFDM 符号长度即 $463.2 \mu\text{s}$, 若距离分辨单元为 30 m , 只有在目标速度达到约 64 km/s 以上时才会发生在等效脉冲内发生距离徙动, 故一般情况下可设目标在等效脉冲内无距离徙动, 则距离随慢时间变化, 重构后信号模型为:

$$\text{echo}(t_f, t_m) = A_e s(t_f - R(t_m)/c) \cdot \exp(-j2\pi f_c R(t_m)/c) \quad (5)$$

$$\text{ref}(t_f, t_m) = A_r s(t_f) \quad (6)$$

其中 $R(t_m) = R(0) - vt_m - 1/2 at_m^2$, $\text{ref}(t_f, t_m)$ 为参考信号。

故匹配滤波后:

$$R(f, t_m) = A_{er} |S(f)|^2 \exp(-j2\pi(f + f_c)R(t_m)/c) \quad (7)$$

将式(7)变换至距离-慢时间域则为

$$r(t_f, t_m) = A_{er} s'(t_f - R(t_m)/c) \exp(-j2\pi f_c R(t_m)/c) \quad (8)$$

式(8)中 $s'(t) = \text{IFFT}(|S(f)|^2)$, $S(f) = \text{FFT}(s(t))$ 。

若回波信号为均匀信号, 则对式(8)沿慢时间做 FFT 即可获取多普勒信息, 得到均匀信号相干积累结果 $\chi(t_f, f_m)$ 。但因非均匀采样导致传统在慢时域直接采用基于 FFT 的多普勒处理方式不再适用, 故本文基于文献[15]的分时隙思想, 考虑对回波信号慢时间再次分段, 使得段内与各段间均为均匀采样, 且因一般再分段后得到的每段时间较短, 多普勒分辨率较低, 故可设目标多普勒在每段内保持不变, 另外, 为便于区分第 1 次分段后的快时间与慢时间, 此时定义段内为子慢时间 t_k , 段间为块时间 t_n , 则 $t_m = t_k + t_n$, $t_k = kT_0$, $k = 0, 1, \dots, K-1$, K 为每个子慢时间内分段数, T_0 为等效脉冲重复间隔即 t_f 的总时间长度, $t_n = nT_p$, $n = 0, 1, \dots, N-1$, N 为总块数, T_p 为每段时间长度, 以 CMMB 为例, 具体分段操作如图 3 所示。

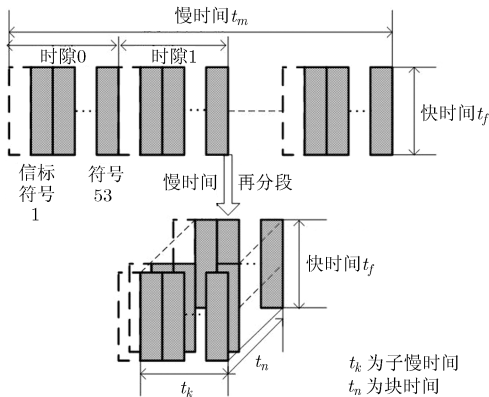


图3 慢时间分段示意图

则式(8)的多普勒处理变为

$$\begin{aligned} \chi(t_f, f_m) &= \int_0^T r(t_f, t_m) \exp(-j2\pi f_m t_m) dt_m \\ &= \sum_{t_n=0}^{(N-1)T_p} \sum_{t_k=0}^{(K-1)T_0} r(t_f, t_k, t_n) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi f_m (t_k + t_n)) \\ &= \sum_{t_n=0}^{(N-1)T_p} \chi(t_f, f_m, t_n) \exp(-j2\pi f_m t_n) \quad (9) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} r(t_f, t_k, t_n) &= A_{er} s'(t_f - R(t_n)/c) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi f_c (R(t_n) - v(t_n)t_k)/c) \quad (10) \end{aligned}$$

对式(10)沿子慢时间维做 FFT, 得

$$\begin{aligned} \chi(t_f, f_m, t_n) &\approx A_{er} s'(t_f - R(t_n)/c) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi f_c R(t_n)/c) F\{f_m - v(t_n)/\lambda\} \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } F\{f_m - v(t_n)/\lambda\} &= \frac{\sin[\pi T_p \{f_m - v(t_n)/\lambda\}]}{\sin[\pi T_0 \{f_m - v(t_n)/\lambda\}]} \\ &\quad \cdot \exp(-j\pi(M-1)T_0 \{f_m - v(t_n)/\lambda\}). \end{aligned}$$

由式(11)可知, 当积累时间比较短, 目标速度与加速度也比较小时, 按照式(9)能对目标回波有效地进行相干积累, 但当积累时间较长, 且目标速度和加速度较大时, 不同分段的互模糊函数峰值会落在不同的距离元和多普勒元内, 若仍按照式(9)进行积累, 则会发生距离徙动和多普勒徙动, 降低信噪比, 不利于对微弱目标的检测, 因此仍需选择一种合适的方法补偿距离徙动和多普勒徙动。

4 外辐射源雷达目标徙动补偿算法

文献[14]提出了一种基于两次短傅里叶变换的徙动补偿算法, 该算法依次进行一次粗多普勒估计和一次精多普勒估计, 将上述两次多普勒估计相加便可得到目标多普勒频率, 该算法假设目标回波在频域 f_m 内没发生多普勒模糊且目标加速度在粗多普勒估计中引起的频移可忽略。但当上述假设不成立时, 该算法的检测性能会因徙动补偿不完全而有所下降。本文基于该思想提出了一种修正算法, 该修正算法分析了上述多普勒模糊和频移问题, 并会对多普勒模糊引起的距离徙动和频移带来的多普勒徙动均给予较好的补偿, 进而使得该算法能更广泛地应用于高速高机动目标的检测。

4.1 距离徙动补偿修正算法

将式(7)沿慢时域分段后有

$$R(f, t_k, t_n) = A_{\text{er}} |S(f)|^2 \exp \left\{ -j \frac{2\pi(f + f_c)}{c} \left[R(0) - v(t_k + t_n) - \frac{1}{2} a(t_n + t_k)^2 \right] \right\} \quad (12)$$

式(12)中时间 t_k 变换至频率 f_k , 且忽略因子 $1/2 at_k^2$ 对频率 f_k 的影响, 得

$$\begin{aligned} R\chi(f, f_k, t_n) &\approx A_{\text{er}} |S(f)|^2 F \left\{ f_k - (f + f_c)/f_c v(t_n)/\lambda \right\} \\ &\cdot \exp \left(-j2\pi(f + f_c)/c \left(R(0) - vt_n - 1/2 at_n^2 \right) \right) \quad (13) \end{aligned}$$

由于载频 f_c 远高于距离频率值 f , 故 $(f + f_c)/f_c \approx 1$, 则式(13)可简化为

$$\begin{aligned} R\chi(f, f_k, t_n) &\approx A_{\text{er}} |S(f)|^2 F \left\{ f_k - v(t_n)/\lambda \right\} \\ &\cdot \exp \left(-j2\pi(f + f_c)/c \left(R(0) - vt_n - 1/2 at_n^2 \right) \right) \quad (14) \end{aligned}$$

其中 $f_k = k/KT_0$, $k = -K/2, -K/2 + 1, \dots, K/2 - 1$ 。

由式(14)可知距离徙动主要与目标速度有关, 为便于后文更精确地估计加速度, 这里不再乘补偿因子^[14] $\exp\{-j2\pi(f/f_c + 1)f_k t_n\}$, 而是考虑在式(14)乘以引起距离徙动的指数项共轭 $\exp\{-j2\pi f_k t_n / f_c\}$ 校正距离徙动, 即

$$\begin{aligned} R\chi_{\text{cmpl}}(f, f_k, t_n) &= A_{\text{er}} |S(f)|^2 \exp \left(-j2\pi f/c \left(R(0) + \delta_v t_n + \delta_a t_n^2 \right) \right) \\ &\cdot \exp \left(-j2\pi f_c \left(R(0) - vt_n - 1/2 at_n^2 \right) / c \right) \\ &\cdot F \left\{ f_k - v(t_n)/\lambda \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

为便于数值计算分析, 设 $f_k = (v_k + a_k t_n)/\lambda$, $\delta_v = v_k - v$, $\delta_a = a_k - 1/2a$, 且定义 f_k 为粗多普勒频率, t_n 对应的频率 f_n 为精多普勒频率。

对式(15)中的距离维求逆傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)并变回快时间域 t_f , 得

$$\begin{aligned} \chi_{\text{cmpl}}(t_f, f_k, t_n) &\approx A_{\text{er}} s'(t_f - R(0)/c) F \left\{ f_k - v(t_n)/\lambda \right\} \\ &\cdot \exp \left(-j2\pi f_c \left(R(0) - vt_n - 1/2 at_n^2 \right) / c \right) \quad (16) \end{aligned}$$

由式(16)知, 时延为常数 $R(0)/c$, 即距离徙动已被校正。

对高速目标而言, 雷达重复频率对目标多普勒频率的采样一般为欠采样, 即

$$f_d = lf_r + \hat{f}_d, \quad |\hat{f}_d| \leq f_r/2 \quad (17)$$

其中 f_r 为雷达重复频率, l 为整数, 表示目标多普勒频率模糊数, 式(16)中时延不再是常数 $R(0)/c$, 而是 $(R(0) + l\lambda/T_0 t_n)/c$, 此时只需搜索 l 后沿快时间维按照 $\text{round}(l\lambda/T_0 t_n/r)$ 进行搬移便可校正欠采样引起的距离徙动^[16], 不需要额外的运算量, 其中 $\text{round}(\cdot)$ 表示四舍五入取整, r 为距离分辨率。

4.2 多普勒徙动补偿修正算法

式(16)可知, 目标加速度满足 $1/T_p \geq |aNT_p/\lambda|$ 时, 只需考虑精多普勒徙动。此时只需构造补偿函数 $\psi_{\text{cpm2}}(t_f, f_k, t_n) = \exp\left\{-j\frac{2\pi f_c}{c} \frac{1}{2} \hat{a} t_n^2\right\}$ 校正多普勒徙动即可。

$$\begin{aligned} R_{\text{cpm2}}(t_f, f_k, t_n) &= \chi_{\text{cmpl}}(t_f, f_k, t_n) \psi_{\text{cpm2}}(t_f, f_k, t_n) \\ &= A_{\text{er}} s'(t_f - R(0)/c) F \left\{ f_k - v(t_n)/\lambda \right\} \\ &\cdot \exp \left(-j2\pi f_c \left(R(0) - vt_n \right) / c \right) \quad (18) \end{aligned}$$

将式(18)中时间 t_n 变换至频率 f_n , 得 $R\chi_{\text{cpm2}}(t_f, f_k, f_n)$ 。

故搜索得到的加速 $\hat{a} = \arg \max \{R_{\text{cpm2}}(t, f_k, f_n)\}_a$, 目标多普勒频率为 $f_m = f_k + f_n$, $k = -K/2, -K/2 + 1, \dots, K/2 - 1, n = -N/2, -N/2 + 1, \dots, N/2 - 1, m = k + n$ 。

当目标加速度满足 $1/T_p \leq |aNT_p/\lambda|$ 时, 目标加速度在块时间内引起的粗多普勒徙动不能忽略, 具体校正算法和 $1/T_p \geq |aNT_p/\lambda|$ 类似, 只需在搜索 \hat{a} 时, 沿子慢时间维按照 $\text{round}(\hat{a} t_n T_p / \lambda)$ 进行频谱搬移^[16]即可, 也不需要额外的计算量。

另外, 当加速度引起的距离弯曲不可忽略时, 只需在搜索 \hat{a} 时沿快时间维按 $\text{round}(\delta_a t_n^2/r)$ 搬移^[16]即可。

5 运算量分析

当外辐射源雷达信号为均匀采样信号时, 分析比较本文算法与已有一些算法^[1,9,12]实现徙动补偿时的运算量。设快时间频域采样点数为 F , 首次分段后等效脉冲数为 M , 慢时间再次分段数为 N , 表 1 中 $L \geq 2M - 1$, 为利用 FFT 快速算法, 必要时需将上述参数补零至 2 的整数幂, A 为加速度 a 的搜索次数, 表 1 和表 2 给出了一些算法的复数乘法次数, 可见, 本文算法相对于这些算法运算量更小, 更易实现。

表 1 距离徙动补偿算法运算量比较

算法	运算量
Keystone 变换中 的 Chirp-Z 变换	$F(L + 2M + 3/2L \log_2 L + 1/2M \log_2 M)$
快速 Radon- Fourier 变换	$F(L + 2M + 3/2L \log_2 L + 1/2M \log_2 M)$
本文算法	$F(1/2M \log_2 M + 2M)$

表 2 多普勒徙动补偿算法运算量比较

算法	运算量
Sandglas 变换	$FM/2(L + 2M + 3/2L \log_2 L + 1/4M \log_2(M/2))$
本文算法	$FM(1 + 1/2 \log_2 N)A$

6 仿真与实测数据处理分析

6.1 仿真实验分析

本节采用仿真数据分析本文算法的有效性。以 CMMB 外辐射源雷达为例，表 3 为系统和目标仿真参数。

表 3 系统和目标仿真参数

带宽	8 MHz	目标初始速度	(-785 m/s, -707 m/s)
载频	658 MHz	初始加速度	41 m/s ²
基带采样率	10 MHz	补偿前信噪比	5 dB

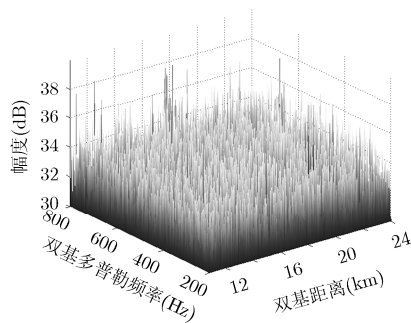


图 4 文献[14]方法补偿后积累结果

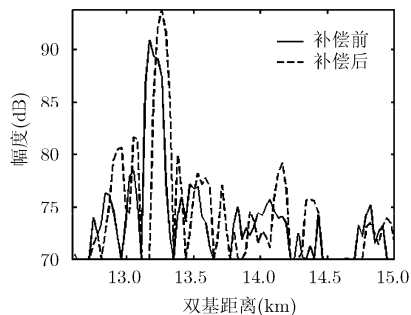


图 6 距离徙动补偿前后积累结果比较

图 4 表示用文献[14]中方法对徙动补偿后积累结果，该文献忽略了目标粗多普勒频率模糊及目标加速度在各段间引起的频移，故当上述多普勒模糊和频移的影响必须考虑时，文献[14]对徙动不能完全补偿，从而微弱目标仍然不能被有效检测，此时该方法不再适用。图 5 表示用本文算法对徙动补偿后积累结果，两目标初始速度估计值为(-787 m/s, -709 m/s)，初始加速度估计值为 40.2 m/s²，由图 5 可知，校正之后信噪比得到很大提高，使得两目标均可被检测。

6.2 实测数据处理分析

选用武汉大学研制的 UHF 波段外辐射源雷达在天河国际机场的实验数据，该实验系统的带宽，载频及基带采样率与表 3 一致，目标均为非合作目标。

数据 1: 数据时间为 2011 年 12 月 2 日，积累时间为 1 s，该实验中目标速度的估计值为 105 m/s，目标仅有距离徙动，目标初始距离为 13.26 km。如图 6 所示，距离徙动补偿后，主瓣变窄，峰值更明显，且补偿后目标初始距离估计值为 13.26 km。

数据 2: 数据时间为 2013 年 11 月 14 日，积累时间为 1 s，该实验中目标加速度的估计值为 8 m/s²，有距离徙动和多普勒徙动，以多普勒徙动为主，目标起始多普勒频率为 33 Hz。图 7 给出了多普勒徙动补偿前后积累结果，该结果中距离徙动已被补偿，由图 7 明显可见多普勒徙动补偿后目标包络相参积

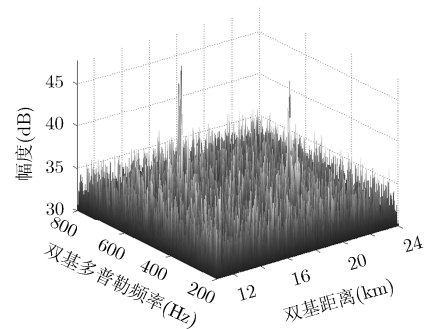


图 5 本文方法补偿后积累结果

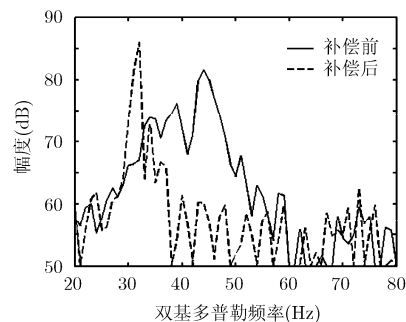


图 7 多普勒徙动补偿前后积累结果比较

累到一个多普勒单元内, 形成一个明显的峰值, 徙动现象消失, 信噪比提高了约 5 dB, 对微弱目标的检测能力得到了明显提高。

7 结束语

当数字电视信号为非均匀采样时, 已有一些徙动补偿算法不再很好地补偿距离徙动和多普勒徙动。为有效解决外辐射源雷达非均匀采样信号的徙动问题, 本文在已有的基于两次短傅里叶变换的徙动校正算法基础上, 提出了一种修正算法, 修正后的该算法能检测具有更大速度和加速度的目标, 可同时适用于非均匀和均匀采样信号。通过仿真分析和实测数据验证, 说明本文提出算法能够较大程度提高信噪比, 算法无需依赖目标的先验信息, 运算量小, 适于实时处理。

参 考 文 献

- [1] 徐冠杰. 雷达信号长时间积累对微弱目标检测的研究[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2011.
 - [2] 张卫杰, 高昭昭, 许博, 等. 基于 Keystone 变换的警戒雷达信号处理[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(9): 2007-2011.
Zhang Wei-jie, Gao Zhao-zhao, Xu Bo, *et al.* Novel signal processing method for surveillance radar based on Keystone transform[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(9): 2007-2011.
 - [3] 张顺生, 曾涛. 基于 keystone 变换的微弱目标检测[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1675-1678.
 - [4] 关欣, 胡东辉, 仲利华, 等. 一种高效的外辐射源雷达高径向速度目标实时检测方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(3): 581-588.
Guan Xin, Hu Dong-hui, Zhong Li-hua, *et al.* An effective real-time target detection algorithm for high radial speed targets in passive radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(3): 581-588.
 - [5] 洪永彬, 高梅国, 王俊岭, 等. Keystone 变换半盲速点效应的抑制和消除[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(1): 175-180.
Hong Yong-bin, Gao Mei-guo, Wang Jun-ling, *et al.* The Suppression and elimination of half blind velocity effect associated with Keystone transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(1): 175-180.
 - [6] Xu Jia, Yu Ji, Peng Ying-ning, *et al.* Radon-Fourier transform (RFT) for radar target detection (I): generalized doppler filter bank[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(2): 1186-1202.
 - [7] Xu Jia, Yu Ji, Peng Ying-ning, *et al.* Radon-Fourier transform (RFT) for radar target detection (II): blind speed sidelobe suppression[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(4): 2473-2489.
 - [8] Xu Jia, Yu Ji, Peng Ying-ning, *et al.* Radon-Fourier transform (RFT) for radar target detection (III): optimality and fast implementations[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(2): 991-1004.
 - [9] 吴兆平, 符渭波, 苏涛, 等. 基于快速 Radon-Fourier 变换的雷达高速目标检测[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(8): 1866-1871.
Wu Zhao-ping, Fu Wei-bo, Su Tao, *et al.* High speed radar target detection based on fast radon-fourier transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(8): 1866-1871.
 - [10] 战立晓, 汤子跃, 朱振波. 高机动小 RCS 目标长时间相参积累检测新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(3): 511-516.
Zhan Li-xiao, Tang Zi-yue, and Zhu Zhen-bo. Novel method of long term coherent integration detection for maneuvering small RCS targets[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(3): 511-516.
 - [11] 杨金禄, 单涛, 陶然. 数字电视辐射源雷达的相参积累徙动补偿算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(2): 407-411.
 - [12] 战立晓, 汤子跃, 朱振波. 一种米波相控阵雷达四代机目标检测算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(5): 1163-1169.
Zhan Li-xiao, Tang Zi-yue, and Zhu Zhen-bo. The fourth generation fighters detection algorithm for metric-band phased array radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(5): 1163-1169.
 - [13] Liu Y, Xing M, Guo R, *et al.* Sandglass transformation for synthetic aperture radar detection and imaging of ship at low signal-to-clutter-plus-noise ratio[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(3): 361-373.
 - [14] Hoshino T, Suwa K, Nakamura S, *et al.* Long-time integration by short-time cross-correlation and two-step Doppler processing for passive bistatic radar[C]. Proceedings of the 43rd European Microwave Conference, Nuremberg, Germany, 2013: 1763-1766.
 - [15] 易建新, 万显荣, 方亮, 等. 中国移动多媒体广播外辐射源雷达相干积累的非均匀采样实现[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(11): 2648-2653.
Yi Jian-xin, Wan Xian-rong, Fang Liang, *et al.* Coherent integration implementation for China mobile multimedia broadcasting based passive radar with nonuniform sampling [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(11): 2648-2653.
 - [16] 杨翔宇, 同武勤, 熊瑾煜. 一种无源雷达高速机动目标检测新方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(12): 3008-3013.
Yi Jian-xin, Tong Wu-qin, and Xiong Jin-yu. A novel algorithm for detection of a maneuvering target in passive radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(12): 3008-3013.
- 王 慧: 女, 1989 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理。
洪丽娜: 女, 1975 年生, 硕士, 副研究员, 研究方向为电磁环境综合动态特性、复杂电磁环境模拟方法及复杂目标特性等。
易建新: 男, 1989 年生, 博士生, 研究方向为外辐射源雷达和超视距雷达信号处理。
万显荣: 男, 1975 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为外辐射源雷达系统、高频雷达系统及雷达信号处理等。