

## 抑制雷达主波束内 GSM 干扰的极化滤波方法研究

任博<sup>\*①②</sup> 施龙飞<sup>①②</sup> 王洪军<sup>③</sup> 李永祯<sup>①②</sup> 王国玉<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(国防科技大学电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室 长沙 410073)

<sup>②</sup>(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

<sup>③</sup>(武汉滨湖电子有限责任公司 武汉 430077)

**摘要:** 针对雷达在实际中受到的GSM通信基站干扰问题, 该文采用极化滤波抗干扰的方法, 在现有自适应极化对消(APC)算法基础上提出了一种基于部分极化波最优接收的滤波算法, 先估计GSM信号的部分极化Stokes矢量, 后依据干扰功率最小原则计算最优接收极化。通过开展极化抗干扰外场试验, 证明了极化滤波方法对于基站干扰抑制的有效性。与传统算法的比较说明了该方法在保证滤波效果的基础上, 用于权值收敛的时间更短, 性能更稳定。

**关键词:** 雷达; GSM干扰; 极化滤波; 部分极化; 抗干扰

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)02-0459-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00257

## Investigation on of Polarization Filtering Scheme to Suppress GSM Interference in Radar Main Beam

Ren Bo<sup>①②</sup> Shi Long-fei<sup>①②</sup> Wang Hong-jun<sup>③</sup> Li Yong-zhen<sup>①②</sup> Wang Guo-yu<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

<sup>②</sup>(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

<sup>③</sup>(Wuhan Binhu Electronics Company of Limited Liability, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** A polarization filtering scheme is employed to resolve interference from GSM base station to the radar in practice. By analyzing the existing Auto Polarization Cancellation (APC) algorithm, a new filtering algorithm based on the optimal reception of partially polarized signal is proposed. The polarization Stokes vector of GSM signal is estimated, and then the optimal receptive polarization is calculated on the principle of the minimum interference power. The effectiveness of polarization filter is finally validated by the experiment of interference suppression. Compared with the existing algorithm, the proposed method not only achieves good performance in anti-interference, but needs shorter time in weight convergence, and it is more stable as well.

**Key words:** Radar; GSM interference; Polarization filter; Partially polarized; Anti-interference

### 1 引言

当前, 随着手机通信基站的广泛建设, 在带来通信便利的同时也带来一些隐患, 例如, GSM通信基站信号对同频段低空预警情报雷达和民航空管雷达造成的干扰事件近年来时有报道<sup>[1]</sup>, 此类事件已经威胁到国土防空和民航安全。通常的解决办法是: 预警情报雷达被迫放弃使用与GSM基站信号相同的频段, 空管雷达附近的通信基站被迫降低发射功率甚至关闭。

关于GSM基站信号对同频段雷达的干扰问题仅有少量文献进行过报道<sup>[2]</sup>, 但仅仅从功率对抗角度

对干扰特性进行了分析, 未能涉及信号层面, 且未能给出对此类干扰的抑制方法。刘爱军等人<sup>[3]</sup>采用极化滤波方法就高频地波雷达对电台干扰的抑制问题进行了研究, 而对于GSM干扰抑制问题, 目前尚未见报道。实际上由于通信基站往往是广域网状分布、时域持续存在, 而雷达目标可能从任意方位进入, 包括从接近于基站方位的方向进入, 因此, 传统的基于空域、时域滤波的抗干扰措施(如旁瓣对消、旁瓣匿影)对于通信基站干扰往往是无效的。而限于技术水平, 只能采用上述频域隔断的办法解决同频段互扰问题, 造成了频谱资源的极大浪费, 尤其是随着手机用户数量的迅速增长和通信基站的建设, 该频段雷达的可用频率资源受到极大的压缩。本文拟采用极化域滤波技术, 利用基站信号电磁波的极化

2013-03-04 收到, 2013-11-08 改回

\*通信作者: 任博 rb410@139.com

矢量特征,通过自适应加权配置雷达双极化天线接收通道的幅相系数来对消GSM基站信号,保证有效发挥其在战场低空目标探测方面的优势。

极化滤波器实质是利用天线对不同入射波在极化域的选择性来改善有用信号的接收质量<sup>[4,5]</sup>。随着极化理论的发展,近年来发展出了基于空域极化滤波<sup>[6-8]</sup>和斜投影极化滤波技术<sup>[3,9-11]</sup>的新型极化对消滤波器。然而实际应用较多的仍然是自适应极化对消滤波器(APC),其概念和实施方案最早是由Nathanson<sup>[12]</sup>在研究雨杂波对消问题时提出。通常先通过两个正交极化天线接收信号估计入射干扰极化状态,然后调整天线接收极化,即两正交接收通道乘以相应的复系数以抑制干扰(虚拟极化适配<sup>[13]</sup>,VPA)。为抑制杂波和部分极化干扰,Poelman等人<sup>[14]</sup>提出了多凹口极化(MLP)滤波器。此后在前两者的基础上Giuli等人<sup>[15]</sup>和Gherardelli<sup>[16]</sup>分别提出了MLP-APC和MLP-SAPC。

现有APC算法已日趋成熟,但在实际工程应用中,收敛步长因子难以自适应,会直接影响到滤波器响应时间及滤波效果。UHF波段雷达的工作场景通常比较复杂,受地形、建筑物反射以及基站本身发射信号复杂性的影响,到达雷达天线的GSM信号通常并非完全极化波,APC算法的性能受到进一步的限制。

本文重点针对GSM干扰位于雷达主波束内的情形,首先分析指出了GSM信号的部分极化波特性和,进而提出了基于Stokes矢量的最佳接收极化计算方法,推导了最佳接收极化的统计表达式。利用实测数据开展极化抗干扰实验,验证了极化滤波方法能够有效抑制GSM基站干扰信号,且相比于传统APC算法,本文提出的滤波方法无需考虑迭代收敛过程中步长因子的选取问题,具有更快的权值收敛速度和更为稳定的干扰抑制性能。

## 2 GSM信号极化特性分析

GSM通信系统采用蜂窝FDMA(频分多址)+TDMA(时分多址)方式通信,移动台发射信号的链路称为上行链路(890~915 MHz),基站发射信号的链路称为下行链路(935~960 MHz),一个脉冲串承载一个时隙所传输的信息,称为“突发”,每个“突发”可以看成是时宽约577 μs,带宽200 kHz的窄带调制信号<sup>[17]</sup>。

GSM信号极化特性外场试验选取了武汉东湖地区一处基站,该基站产生的GSM信号中心频率位于953.2 MHz,带宽为200 kHz,接收天线由2行8列共16个正交双极化天线阵元构成,接收信号由水

平(H),垂直(V)两极化接收通道接收,分别下变频至中频,后经A/D板采样得到H通道和V通道的IQ数据。由上述分析可知,GSM信号可认为是具有一定带宽的平面电磁波,由于实际中不可避免受到外界复杂的电磁传播环境以及接收机通道间幅相一致性在各频率上的不稳定变化等因素的影响,造成接收信号的极化状态随机起伏,应视其为部分极化电磁波。假设满足各态历经性,接收信号在任意正交基上的电场分量可认为是关于时间的缓变过程,可以将GSM信号矢量表征为

$$\mathbf{S}_r(n) = \begin{bmatrix} s_{rh}(n) \\ s_{rv}(n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $s_{rh}(n)$ 和 $s_{rv}(n)$ 分别表示H通道,V通道接收到的GSM信号。通过以时间平均代替集平均的部分极化波方式定义其Stokes矢量参数为<sup>[18]</sup>

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle |s_{rh}(n)|^2 \rangle + \langle |s_{rv}(n)|^2 \rangle \\ \langle |s_{rh}(n)|^2 \rangle - \langle |s_{rv}(n)|^2 \rangle \\ 2 \operatorname{Re} \langle s_{rh}(n) s_{rv}^*(n) \rangle \\ -2 \operatorname{Im} \langle s_{rh}(n) s_{rv}^*(n) \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

任意选取100个时长为577 μs的“突发”脉冲信号,分别计算其Stokes矢量,并以 $g_0$ 做归一化处理。将各矢量点绘制在Poincare极化球上,如图1所示。由图1可见,接收到的GSM信号较集中地分布于极化球的下半球体内某点附近,接近右旋椭圆极化,但由于没有位于球面因此为部分极化波,图2则给出了所选取的GSM信号每个“突发”的极化度PD,其中 $PD = \sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2} / g_0$ 。由图2不难看出GSM信号的极化度在0.88到0.93之间起伏,是典型的部分极化波,而非完全极化波。

## 3 针对部分极化波的极化滤波算法

### 3.1 APC迭代滤波方法

APC迭代滤波方法是以干扰输出功率最小为准则,通过矢量迭代的方式尽可能使接收极化与干扰极化互为交叉极化,以达到对干扰的抑制效果<sup>[19]</sup>。极化对消通常分两步进行:首先只接收干扰信号,进行迭代计算,获得辅助通道的最佳权系数;然后用最佳权系数对辅助极化通道加权以对消干扰,图3给出了极化对消器的处理流程。

算法的基本原理是假设天线1和天线2的极化状态用归一化Jones矢量表示为 $\mathbf{h}_1$ 和 $\mathbf{h}_2$ ;设干扰信号极化状态矢量表示为 $\mathbf{h}_j$ ,干扰信号矢量表达式为 $\mathbf{h}_j \cdot s_j(n)$ ,平均功率为 $P_j$ 。主极化通道和辅助极化通道的接收信号分别为

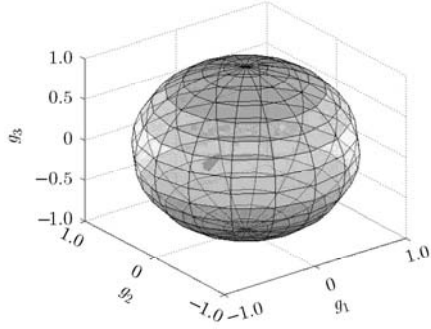


图1 GSM信号在极化球上的分布

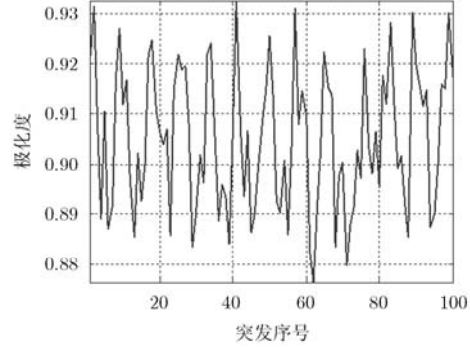


图2 GSM信号极化度变化图

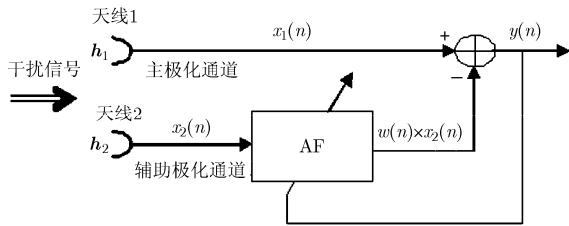


图 3 APC 权系数迭代过程

$$\begin{cases} x_1(n) = \mathbf{h}_1^T \mathbf{h}_j \cdot s_j(n) + n_1(n) \\ x_2(n) = \mathbf{h}_2^T \mathbf{h}_j \cdot s_j(n) + n_2(n) \end{cases} \quad (3)$$

式中  $n_1(n)$  和  $n_2(n)$  分别为两极化通道的噪声信号，相互间独立，设噪声平均功率均为  $P_n$ 。输出信号为

$$y(n) = x_1(n) - w(n) \cdot x_2(n) \quad (4)$$

$w(n)$  是辅助通道权系数。

为使干扰信号输出功率最小，需寻找使两通道均方误差最小的最优权值，文献[19]利用最陡梯度思想给出最优权值递推公式如下：

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu \cdot y(n) \cdot x_2^*(n) \quad (5)$$

其中  $\mu$  称为步长因子，其决定收敛条件及收敛时间，为保证收敛，步长因子应满足  $0 < \mu \ll 1/(P_j + P_n)$ 。在满足权值收敛的情况下，终止迭代计算，按式(6)进行极化对消：

$$\begin{cases} y'_1(n) = x'_1(n) - w_{\text{opt}} \cdot x'_2(n) \\ y'_2(n) = x_1(n) - w_{\text{opt}} \cdot x_2(n) \end{cases} \quad (6)$$

式中  $x'_1(n) = \mathbf{h}_1^T \mathbf{h}_s \cdot s(n) + \mathbf{h}_1^T \mathbf{h}_j \cdot s_j(n) + n_1(n)$ ,  $x'_2(n) = \mathbf{h}_2^T \mathbf{h}_s \cdot s(n) + \mathbf{h}_2^T \mathbf{h}_j \cdot s_j(n) + n_2(n)$ ，其中  $\mathbf{h}_s \cdot s(n)$  为期望目标信号的矢量表示式， $y'_j(n)$  为干扰对消后剩余，设剩余干扰功率为  $P_j^0 = E\{[y'_j(n)]^2\}$ ，定义干扰滤波性能指标参量极化抑制比  $\gamma = P_j / P_j^0$ ，即对消前干扰总功率和对消后干扰剩余功率的比值。

### 3.2 基于部分极化波最优接收的滤波方法

上述APC算法基于最小均方误差(LMS)的思想，理论上可以使对消前后干扰功率抑制比达到最

佳，但算法中步长因子  $\mu$  的选取存在一定的难度，工程中通过干扰和噪声功率预估的方法来设定，在实际应用中发现， $\mu$  值的选取往往会严重影响收敛速度和对消前后的抑制效果。

本节提出一种基于部分极化波最优接收的滤波算法：对正交极化通道接收到的干扰信号进行采样，统计干扰信号的极化Stokes矢量，进而针对该Stokes矢量推导得到了最佳接收极化矢量的表达式及极化通道加权系数，通过对两极化通道加权合并可将干扰信号对消。

该方法对信号矢量进行时间统计平均以及直接变换，替代了现有APC算法的时域迭代计算，从而寻找到最佳极化矢量，不存在迭代算法中因难以设定最佳步长因子带来的性能损失，具有更为稳定可靠的性能。算法具体实现过程如图4所示。

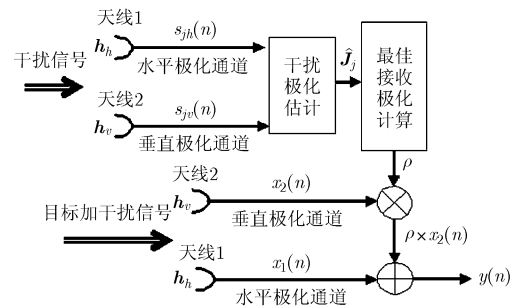


图 4 最佳接收极化计算实现流程

图4中  $\mathbf{h}_h$  和  $\mathbf{h}_v$  分别为水平、垂直极化天线，下面推导基于部分极化最优接收的计算公式。设水平和垂直极化通道接收到的干扰信号分别为  $s_{jh}(n)$  和  $s_{jv}(n)$ ，干扰极化的Stokes矢量的估计为  $\hat{\mathbf{J}}_j = [g_{j0}, \mathbf{g}_j^T]^T$ ，其估计方法如式(2)所示，其中  $\mathbf{g}_j = [g_{j1}, g_{j2}, g_{j3}]^T$  为干扰极化Stokes子矢量。假设使干扰功率最小的最优接收天线极化为  $\mathbf{J}_r = [1 \ \mathbf{g}_r^T]^T$ ，这里  $\mathbf{g}_r = [g_{r1}, g_{r2}, g_{r3}]^T$  为接收极化Stokes子矢量，则天线接收干扰信号功率为<sup>[18]</sup>

$$P_r = \frac{1}{2} \mathbf{J}_r \mathbf{U}_4 \hat{\mathbf{J}}_j \quad (7)$$

其中  $\mathbf{U}_4 = \text{diag}\{1, 1, 1, -1\}$ ，代入式(7)可得

$$P_r = \frac{1}{2} [\mathbf{1}, \mathbf{g}_r^T] \mathbf{U}_4 \begin{bmatrix} g_{j0} \\ \mathbf{g}_j \end{bmatrix} = \frac{1}{2} g_{j0} + \frac{1}{2} \mathbf{g}_r^T \text{diag}\{1, 1, -1\} \mathbf{g}_j \quad (8)$$

式中  $g_{j0}$  为到达天线前端的干扰总功率，为使接收到的干扰信号得到最大限度的抑制，最优接收极化等价于求解以下目标函数的最优化问题：

$$\min_{\mathbf{g}_r} (\mathbf{g}_r^T \text{diag}\{1, 1, -1\} \mathbf{g}_j), \quad \text{s.t.} \quad \|\mathbf{g}_r\| = 1 \quad (9)$$

根据矩阵理论可以直接写出最佳接收极化子矢量  $\mathbf{g}_{ro}$  的表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_{ro} &= -\frac{1}{\|\text{diag}\{1, 1, -1\} \mathbf{g}_j\|} \text{diag}\{1, 1, -1\} \mathbf{g}_j \\ &= -\frac{1}{\|\mathbf{g}_j\|} \begin{bmatrix} g_{j1} \\ g_{j2} \\ -g_{j3} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

由于水平、垂直极化基下的极化比  $\rho_{HV}$  与 Stokes 矢量  $\mathbf{J} = [g_0, g_1, g_2, g_3]^T$  之间存在如下关系式：

$$\rho_{HV} = \frac{g_2 + jg_3}{g_0 + g_1} \quad (11)$$

将式(10)代入式(11)可以得到用于对V通道加权的最优权值如式(12)所示：

$$\rho = \frac{-g_{j2} + jg_{j3}}{\|\mathbf{g}_j\| + g_{j1}} \quad (12)$$

V通道加权后与H通道合并得到对消后的输出为

$$y(n) = x_1(n) + \rho \cdot x_2(n) \quad (13)$$

式中  $x_1(n)$  和  $x_2(n)$  分别为水平和垂直通道接收到的信号采样。

## 4 干扰对消试验与滤波算法性能分析

### 4.1 干扰对消试验

干扰对消外场试验仍选取第2节中提到的基站作为GSM干扰源，同时由信号源和线极化天线构成的辐射源，用以模拟目标回波，分别采用上述两种极化滤波算法进行干扰对消和干扰背景下的目标检测实验。

试验中利用信号源产生LFM信号，用以模拟目标回波，通过喇叭天线产生具有一定倾角的线极化，接收方式不变。图5(a)，图5(b)分别为H通道，V通道接收信号经脉冲压缩后的时域结果，不难看出H通道脉冲压缩后的回波信号已被干扰完全淹没，V通道虽然目标回波可见但因信干噪比较低，无法达到检测门限。图5(c)为经APC方法滤波后的信号时域，基于部分极化波最优接收的滤波结果如图5(d)

所示。经对比可知，极化滤波后的信号在保证目标功率损失很小的基础上，使得接收到的干扰信号功率明显降低，目标获益约11 dB。从而说明了极化滤波方法对于抑制GSM基站干扰是有效的。

### 4.2 滤波算法性能比较

仍采用上节试验场景，关闭目标模拟信号源，只接收基站干扰信号，分别采用两种算法滤波后进一步分析。对于现有APC算法，图6(a)为分别采用3种步长因子时的权系数收敛过程曲线，根据步长因子的收敛条件  $0 < \mu \ll 1/(P_j + P_n)$ ，为便于计量，定义步长尺度因子  $\mu = \mu \cdot (P_j + P_n)$ ，即步长因子与干扰噪声总功率的乘积。对消前后抑制比随步长因子的变化关系如图6(b)所示，以步长尺度因子为坐标横轴，纵轴表示滤波前后的干扰极化抑制比。由图6(b)可知，现有APC算法对干扰的抑制效果受步长因子影响较大，只有当  $0.1 < \mu < 0.0025$  时，对消前后的干扰抑制比较高，最高可以达到11.3 dB，综合两幅图可见，当步长因子较大时，权值收敛所需时间减小，但同时权系数起伏较大，权值的起伏造成了对消抑制比的下降；而当步长因子较小时，权值起伏变小，但由于收敛时间长度不够，未能达到最佳权值，从而也会造成对消效果变差。

图6(c)是分别采用两种滤波算法时极化抑制比随权值计算时间(APC算法的迭代时间，最优接收算法的极化统计时间)的变化关系：任意截取一段时长约600  $\mu\text{s}$  的GSM信号，设定权值计算时间在20 ~ 600  $\mu\text{s}$  之间变化，APC算法中步长尺度因子  $\mu = 0.01$ 。由图6(c)可见，采用APC算法时，为获得最佳极化抑制比，至少需要约280  $\mu\text{s}$ ，且在未达到收敛时间的情况下衰减严重；相比而言，采用部分极化波最优接收滤波方法达到各自最佳性能所需权值计算时间仅需50  $\mu\text{s}$ ，且抑制效果几乎不受计算时间的影响，因此干扰抑制效率得到明显提高的同时，抑制效果更加稳定。

## 5 结束语

为解决基站GSM信号对同频段雷达引起的干扰问题，本文提出采用极化滤波抗干扰的方法。首先利用实验数据分析了GSM基站信号在极化球上的分布特性，说明了利用极化方法抑制该类干扰的可行性；然后针对现有APC迭代算法在工程实现中存在的问题，提出一种新的基于部分极化波最优接收的极化滤波算法，克服了迭代算法步长因子难以设定的问题，性能更为稳定。最后开展外场极化抗干扰试验，验证了极化滤波算法对于GSM干扰信号抑制的有效性，并通过比较说明了本文算法相比现

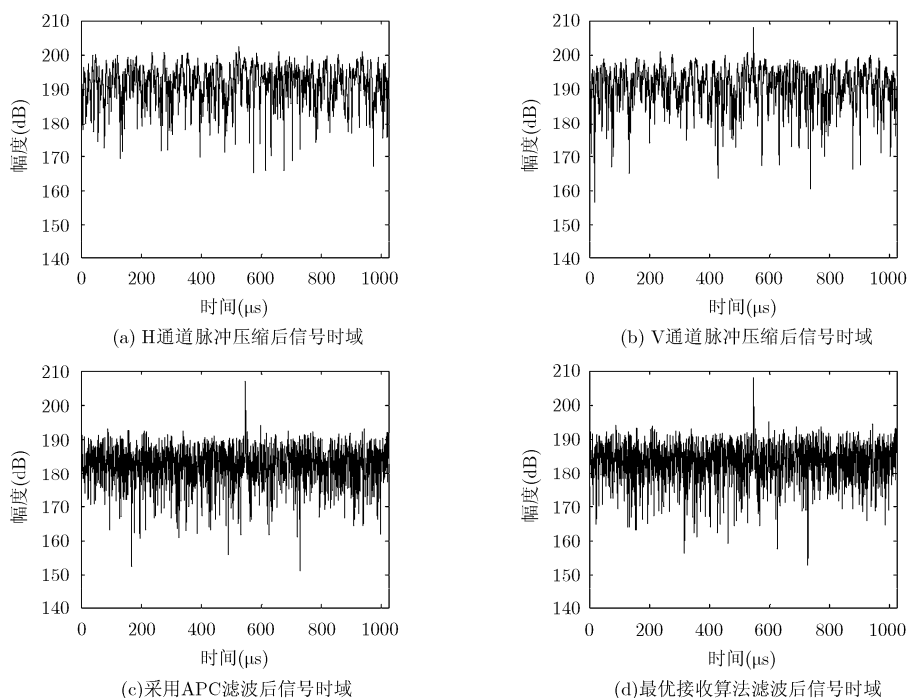


图5 滤波前后信号时域

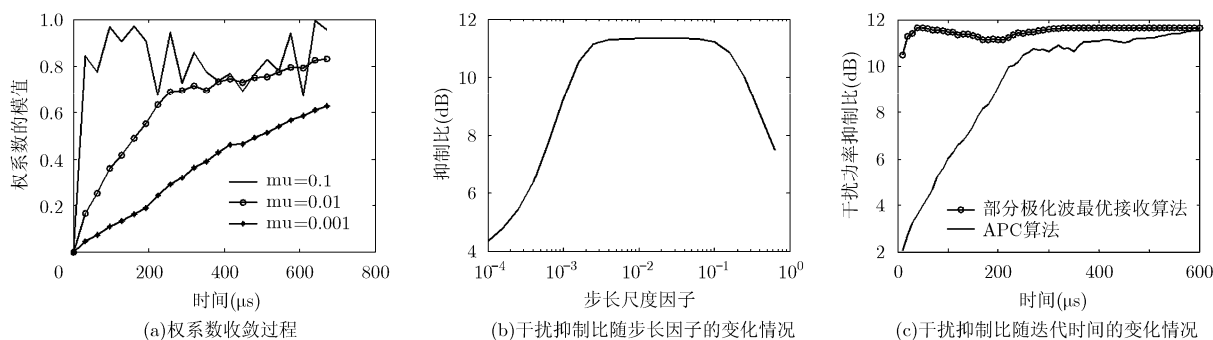


图6 滤波算法性能的比较

有APC迭代滤波方法，在保证滤波效果的同时用于计算权值的时间更短，性能更稳定。本文主要针对位于主波束内的单个基站信号，对雷达干扰的问题进行了相关讨论，对于多个基站多目标的情况将作为下一步研究的工作。

### 参考文献

- [1] 高云, 畅洪涛, 聂宏斌, 等. 一起公众移动通信基站信号干扰民航二次雷达的案例分析[J]. 中国无线电, 2009(11): 67-71.  
Gao Yun, Chang Hong-tao, Nie Hong-bin, *et al.* A case analysis of civil aviation secondary radar interfered by public communication base station signal[J]. *China Radio*, 2009(11): 67-71.
- [2] 赵铁英, 杜鹏程, 王永良. GSM移动通信系统对同频段LFM雷达干扰的分析[J]. 空军雷达学院学报, 2006, 20(3): 171-173.  
Zhao Tie-ying, Du Peng-cheng, and Wang Yong-liang. Analysis of interference of GSM system to LFM radar in the same frequency channel[J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2006, 20(3): 171-173.
- [3] 刘爱军, 毛兴鹏, 邓维波. 基于斜投影极化滤波的高频雷达电台干扰抑制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(4): 1177-1182.  
Liu Ai-jun, Mao Xing-peng, and Deng Wei-bo. Radio interference suppression for high frequency radar based on oblique projection polarization filtering[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2011, 41(4): 1177-1182.
- [4] 王雪松, 汪连栋, 肖顺平, 等. 自适应极化滤波器的理论性能分析[J]. 电子学报, 2004, 32(4): 1326-1329.  
Wang Xue-song, Wang Lian-dong, Xiao Shun-ping, *et al.* Theoretical performance analysis of adaptive polarization filters[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(4): 1326-1329.
- [5] Wang Xue-song, Chang Yu-liang, Dai Da-hai, *et al.* Band

- characteristics of SINR polarization filter[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2007, 55(4): 1148-1154.
- [6] Dai Huan-yao, Wang Xue-song, Li Yong-zhen, *et al.* Main-lobe jamming suppression method of using spatial polarization characteristics of antennas[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(3): 2167-2179.
- [7] 刘勇, 戴幻尧, 李金梁, 等. 空域虚拟极化滤波原理及实验结果[J]. *电波科学学报*, 2011, 26(2): 272-279.  
Liu Yong, Dai Huan-yao, Li Jin-liang, *et al.* Principle and experimental results of spatial virtual polarization filtering algorithm[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2011, 26(2): 272-279.
- [8] 戴幻尧, 李永祯, 刘勇, 等. 单极化雷达的空域零相移干扰抑制极化滤波器[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(2): 290-295.  
Dai Huan-yao, Li Yong-zhen, Liu Yong, *et al.* Spatial null phase-shift interference suppression polarization filter design for single polarized radars[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(2): 290-295.
- [9] Mao X P, Liu A J, Hou H J, *et al.* Oblique projection polarisation filtering for interference suppression in high-frequency surface wave radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, 6(2): 71-80.
- [10] Hong Hong, Mao Xing-peng, and Hu Cui. A multi-domain collaborative filter for HFSWR based on oblique projection[C]. 2012 IEEE Radar Conference, Atlanta, GA, 2012: 0907-0912.
- [11] 毛兴鹏, 刘爱军, 邓维波, 等. 斜投影极化滤波器[J]. *电子学报*, 2010, 38(9): 2003-2008.  
Mao Xing-peng, Liu Ai-jun, Deng Wei-bo, *et al.* An oblique projecting polarization filter[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(9): 2003-2008.
- [12] Nathanson F E. Adaptive circular polarization[C]. IEEE International Radar Conference, Arlington, VA, 1975: 221-225.
- [13] Poelman A J. Virtual polarization adaptation, a method of increasing the detection capabilities of a radar system through polarization-vector processing[J]. *IEE Proceedings F Communications, Radar and Signal Processing*, 1981, 128(5): 261-270.
- [14] Poelman A J and Guy J R F. Multinotch logic-product polarization suppression filters: atypical design example and its performance in a rain clutter environment[J]. *IEE Proceedings F Communications, Radar and Signal Processing*, 1984, 131(7): 383-396.
- [15] Giuli D, Fossi M, and Gheraadelli M. A technique for adaptive polarization filtering in radars[C]. Proceedings of IEEE International Radar Conference, Arlington, VA, 1985: 213-219.
- [16] Gherardelli M. Adaptive polarization suppression of intentional radar disturbance[J]. *IEE Proceedings F Radar and Signal Processing*, 1990, 137(6): 407-417.
- [17] 何希才, 卢孟夏. 现代蜂窝移动通信系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999: 287-305.  
He Xi-cai and Lu Meng-xia. Modern Cellular Mobile Communication System[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 1999: 287-305.
- [18] 庄钊文, 肖顺平, 王雪松. 雷达极化信息处理及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 101-109.  
Zhuang Zhao-wen, Xiao Shun-ping, and Wang Xue-song. Radar Polarization Information Processing and Application [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1999: 101-109.
- [19] 施龙飞, 王雪松, 徐振海, 等. APC迭代滤波算法与性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(9): 1560-1564.  
Shi Long-fei, Wang Xue-song, Xu Zhen-hai, *et al.* The iterative-filtering scheme and its performance analysis of APC[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(9): 1560-1564.
- 任博: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为雷达极化信息处理、综合电子信息系统建模与仿真。
- 施龙飞: 男, 1978年生, 副研究员, 研究方向为雷达极化信息处理、雷达系统仿真。
- 王洪军: 男, 1986年生, 工程师, 研究方向为相控阵雷达天馈线系统设计与仿真。
- 李永祯: 男, 1977年生, 副教授, 研究方向为雷达极化信息处理、目标识别。