基于极化椭圆参数的零导数正交搜索最优极化方法

杨运甫[1,2],陶 然[1],王 越[1]
(1. 北京理工大学电子工程系,北京 100081;2. 解放军炮兵学院二系,安徽合肥 230031)

摘 要: 针对基于极化椭圆参数的信干噪比参量等式,提出一种基于极化椭圆参数的零导数正交搜索极化优化方法并进行了详细的讨论. 该方法首先沿着一条特殊的基线进行局部优化就基本接近全局最优点,接着进行两个正交方向上的零导数搜索,而且搜索过程中每一步都只需简单地利用前一步局部最优解的结果. 经过大量试验,给出了参数范围. 结果表明 ZDOS 方法是有效的,基本上只需几步计算后就找到了全局最优点.

关键词: 极化椭圆; 最优极化; 正交搜索
中图分类号: TN95 **文献标识码**: A **文章编号**: 0372-2112 (2005) 10-1812-05

Zero Differential Orthogonal Searching for Optimal Polarization Based on the Polarization ellipse Parameters

YANG Yun-fu[1,2], TAO Ran[1], WANG Yue[1]
(1. *Dept. of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Dept.* 2, *Artillery Academy of PLA, Hefei, Anhui* 230031, *China*)

Abstract: For the SINR (signal-to-interference-and-noise-ratio) equation based on the polarization ellipse parameters, an optimal polarization scheme called Zero Differential Orthogonal Searching (ZDOS) is suggested and discussed in detail. There are three key points in ZDOS: the global optimal point of SINR is approached to by the first optimization along a special line, then the searching processes are designed along two orthogonal lines to search minimal differential in each direction, and used only the previous local optimal solutions simply. Many experiments are made, and the range of the parameters is given. These experiment results show that ZDOS scheme takes generally several steps to reach the global optimum.

Key words: polarization ellipse; optimal polarization; orthogonal searching

1 引言

在极化优化接收中,文献[1]定义了信号干扰噪声比,从极化球上信号、干扰及天线极化点所处的平面出发,得出了一个信干噪比参量等式,并分析了几种优化策略的性能,但[1]中的变量为天线极化与信号和干扰极化点所夹的球心角,文中没有说明如何用极化参数来描述球心角,即如何在实际极化雷达中控制极化参数的改变. 文献[2～4]从上述三点及球心共四点所形成的棱柱出发,分别在得出了大圆和小圆极化轨道约束下的最优极化,但正于文[4]中所述,该式的解析解很难得到. 文献[6]研究了干扰环境中部分极化信号的最佳滤波问题,以信号干扰噪声比为优化对象,建立了带约束非线性优化模型,利用拉格朗日乘子法和参量矩阵的反对称性,将非线性最优化问题转化为二次代数方程求根问题,得到了最优化问题两个备选解的解析表达式. 另外还有很多有关极化滤波和优化接收的文献[7～11]. 文[5,12]分别从不同角度得出了基于极化椭圆参数的信干噪比参量等式,文[13]给出了三步搜索比较法 TSSC. TSSC 策略只需三次局部最优计算并进行比较就几乎达到了全局最优,但只能以(96 %)的概率找到最优点,所以该问题还没有完全解决. 本文则从另外一个角度提出了一种新的搜索方法,称为正交向零导数搜索. 该方法的思路如下:首先发现了一条特殊的基线,该基线接近全局最优点,然后计算该基线上的局部最优点,接着在该点上沿着另一方向(正交方向)进行搜索,搜索的准则是使该方向上的导数(实际上是导数的分子)尽可能地小,这类似最陡下降法(在方向导数最小的方向上搜索最小值或最大值),但在搜索过程中,不是在所有方向上进行穷举法搜索最小的导数,而只需简单地利用局部最优解的结果(做一步局部最优计算)作为下一次搜索的起点,以后重复上述两个方向(正交的)上的局部最优计算,直至两个方向上的导数都小于一个事先设定的很小的正数时为止. 试验表明,ZDOS 方法基本上只需几步(4～6步)计算后就找到了全局最优点.

收稿日期:2004-12-18;修回日期:2005-07-29
基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 60232010);高校青年教师奖资助项目

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2　基于极化椭圆参数的信干噪比参量等式

极化球面上极化椭圆参数信干噪比参量如式(1):

$$D(2\varepsilon,2\tau)=\frac{1+\sin 2\varepsilon_s\sin 2\varepsilon+\cos 2\varepsilon_s\cos 2\varepsilon\cos(2\tau-2\tau_s)}{2+K+K\sin 2\varepsilon_i\sin 2\varepsilon+K\cos 2\varepsilon_i\cos 2\varepsilon\cos(2\tau-2\tau_i)} \tag{1}$$

D 称为信干噪比参量,为由于干扰存在使得信噪比降低的系数,是由信干噪比的定义 $SINR=SNR\cdot D$ 中得来的,SNR 为信噪比,K 为干扰噪声功率比. $(2\varepsilon,2\tau)$,$(2\varepsilon_s,2\tau_s)$,$(2\varepsilon_i,2\tau_i)$ 分别为天线 r、信号 s 和干扰 i 的极化椭圆参数. D 是 2ε 和 2τ 的二维连续可导函数,$2\varepsilon\in(-\pi,\pi)$,$2\tau\in(0,2\pi)$. D 越大,说明接收效果越好.

3　正交向零导数搜索极化优化方法

式(1)中的 D 与三对极化椭圆参数及干噪比 K 都有关. 极化优化的目的是求取合适的天线极化椭圆参数 $(2\varepsilon,2\tau)$,使 D 最大,从而使得 $SINR$ 最大. 由于直接求式(1)的解析解很困难,现提出一种称为零导数正交向搜索的方法(Zero Differential Orthogonal Searching:ZDOS).

首先讨论如何得到局部优化点. 在式(1)中,D 对 2τ 的偏导数为

$$\frac{\partial}{\partial(2\tau)}D(2\varepsilon,2\tau)=\frac{Y}{W^2} \tag{2}$$

$$Y=k_1\cos 2\varepsilon+k_2\sin 2\tau-k_3$$

$$k_1=\cos 2\varepsilon_s\cos 2\varepsilon(2+K+K\sin 2\varepsilon_i\sin 2\varepsilon)\sin 2\tau_s$$
$$-K\cos 2\varepsilon_i\cos 2\varepsilon(1+\sin 2\varepsilon_s\sin 2\varepsilon)\sin 2\tau_i$$

$$k_2=K\cos 2\varepsilon_i\cos 2\varepsilon(1+\sin 2\varepsilon_s\sin 2\varepsilon)\cos 2\tau_i$$
$$-\cos 2\varepsilon_s\cos 2\varepsilon(2+K+K\sin 2\varepsilon_i\sin 2\varepsilon)\cos 2\tau_s$$

$$k_3=K\cos 2\varepsilon_i\cos 2\varepsilon\cos 2\varepsilon_s\cos 2\varepsilon\sin(2\tau_i-2\tau_s)$$

$$W=2+K+K\sin 2\varepsilon_i\sin 2\varepsilon+K\cos 2\varepsilon_i\cos 2\varepsilon\cos(2\tau-2\tau_i)$$

令 D 对 2τ 的偏导数为 0,可得到

$$k_1\cos 2\tau+k_2\sin 2\tau-k_3=0 \tag{3}$$

解式(3)可得

$$2\tau_{opt}=\phi_1+\phi_2\mod(2\pi)\begin{cases}\phi_1=\operatorname{sign}(k_2)\cos^{-1}(k_1/\sqrt{k_1^2+k_2^2})\\ \phi_2=\cos^{-1}(k_3/\sqrt{k_1^2+k_2^2})\quad \phi_2\in(0,\pi)\end{cases} \tag{4}$$

可以证明,D 在点 $(2\varepsilon,2\tau_{opt})$ 处最大. 因为:$\phi_2\in(0,\pi)$,$\sin\phi_2\geq 0$

$$\left.\frac{\partial^2 D(2\varepsilon,2\tau)}{\partial(2\tau)^2}\right|_{2\tau=2\tau_{opt}}=-\frac{\sqrt{k_1^2+k_2^2}}{[W_{2\tau=2\tau_{opt}}]^2}\sin\phi_2\leq 0$$

在式(1)中,D 对 2ε 的偏导数为

$$\frac{\partial D(2\varepsilon,2\tau)}{\partial(2\varepsilon)}=\frac{X}{W^2} \tag{5}$$

$$X=c_1\cos 2\varepsilon+c_2\sin 2\varepsilon-c_3$$

$$c_1=(2+K)\sin 2\varepsilon_s-K\sin 2\varepsilon_i$$

$$c_2=K\cos 2\varepsilon_i\cos(2\tau-2\tau_i)-(2+K)\cos 2\varepsilon_s\cos(2\tau-2\tau_s)$$

$$c_3=K\sin 2\varepsilon_i\cos 2\varepsilon_s\cos(2\tau-2\tau_s)-K\cos 2\varepsilon_i\cos(2\tau-2\tau_i)\sin 2\varepsilon_s$$

令 D 对 2ε 的偏导数为 0,得

$$c_1\cos 2\varepsilon+c_2\sin 2\varepsilon-c_3=0 \tag{6}$$

从而可解得式(6)的局部优化解为

$$2\varepsilon_{opt}=\begin{cases}\varepsilon_1+\varepsilon_2\mod(2\pi)\\ \text{且 }2\varepsilon_{opt}=2\varepsilon_{opt}-2\pi\quad \text{若 }2\varepsilon_{opt}>\pi\end{cases}$$
$$\varepsilon_1=\operatorname{sign}(c_2)\cos^{-1}(c_1/\sqrt{c_1^2+c_2^2}) \tag{7}$$
$$\varepsilon_2=\cos^{-1}(c_3/\sqrt{c_1^2+c_2^2})\quad \varepsilon_2\in(0,\pi)$$

同样可证明 D 在点 $(2\varepsilon_{opt},2\tau)$ 处最大.

然后,介绍 ZDOS 方法,参见图 1. 第一步是沿着一个特殊的方向 $2\tau=2\tau_i$ 进行优化,得到局部优化点 $(2\varepsilon_{opt},2\tau_i)$. 第二步是在此点处沿着 $2\varepsilon=2\varepsilon_{opt}$(与 $2\tau=2\tau_i$ 正交的方向)进行局部优化,得到局部优化点 $(2\varepsilon_{opt},2\tau_{opt})$. 图中的虚线框表示 ZDOS 沿着 $2\tau=2\tau_i+\pi\mod(2\pi)$ 方向而不是沿 $2\tau=2\tau_i$ 方向进行搜索.

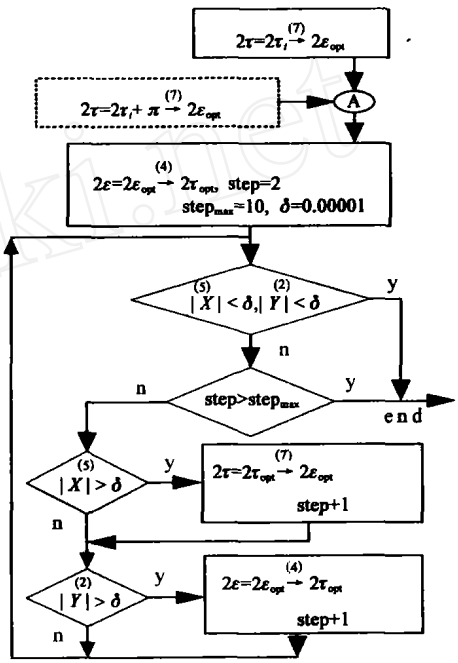


图 1　ZDOS 搜索方法框图

在图 1 中,δ 是一个事先设定好的很小的正数,X、Y 分别为 D 对 2γ 和 ψ 的偏导数的分子,见式(2,4). 如果 X 比 δ 大,第三步以第二步得到的优化点为起点,搜索方向为 $2\tau=2\tau_{opt}$,得到新的优化点 $(2\varepsilon_{opt},2\tau_{opt})$,此时 $2\varepsilon_{opt}$ 得到了更新. 如果 Y 比 δ 大,下一步以第三步得到的优化点为起点,搜索方向为 $2\varepsilon=2\varepsilon_{opt}$,得到新的优化点 $(2\varepsilon_{opt},2\tau_{opt})$,此时 $2\tau_{opt}$ 得到了更新. 若 X 和 Y 都比 δ 小,则搜索过程停止,最终的优化解为 $D(2\varepsilon_{opt},2\tau_{opt})$,否则重复上述搜索过程,直至 X 和 Y 都比 δ 小为止. 不过,当设定的 δ 非常小时,为避免出现 X 和 Y 都不比 δ 小时搜索过程进入死循环的状态,有必要设定一个最大搜索步数 $step_{max}$,无论如何,当搜索步数超过 $step_{max}$ 步时即停止搜索,这里假定 $step_{max}=10$.

4　仿真结果

以下用表 1 中的四组极化椭圆参数来展示相应的 SINR 峰值搜索过程.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图 2 是搜索结果示意图,四个图形中的 8 个峰都分别被 ZDOS 方法沿着 $2\tau = 2\tau_i$ 和 $2\tau = 2\tau_i + \pi$ 两个方向准确地找到了,其中 $\delta = 0.00005$, $step_{max} = 10$. 表 1 中的下半部分是用 ZDOS 方法沿着两个方向所得到的搜索结果,其每一组的上面一行为沿着 $2\tau = 2\tau_i$ 方向的结果,下面一行对应为沿着 $2\tau = 2\tau_i + \pi$ 方向的结果. 所得到的导数(分子)几乎为零,这与实际情况相符,即峰值点的导数为零. 找到的最优值 D 均等于用全局搜索法得到的最优值 D_g. 平均搜索步为 3～5 步,仅在(d)组数据中达到最大搜索步(10 步).

表 1 搜索结果

已知参数					
(a) $2\varepsilon_s = 53°, 2\tau_s = 145°, 2\varepsilon_i = 018°, 2\tau_i = 213°, K = -3$dB, $Dg = 0.756081162$					
(b) $2\varepsilon_s = 154°, 2\tau_s = 166°, 2\varepsilon_i = -39°, 2\tau_i = 117°, K = 14$dB, $Dg = 0.872154272$					
(c) $2\varepsilon_s = -166°, 2\tau_s = 150°, 2\varepsilon_i = 141°, 2\tau_i = 270°, K = 2$dB, $Dg = 0.855691225$					
(d) $2\varepsilon_s = -100°, 2\tau_s = 266°, 2\varepsilon_i = 68°, 2\tau_i = 157°, K = 27$dB, $Dg = 0.946067469$					
X	Y	Steps	D	$2\varepsilon_{opt}$(°)	$2\tau_{opt}$(°)
(a) 0.00000000	-0.00000012	5	0.75608116	130.1085	289.4044
0.00000000	-0.00000003	5	0.75608116	49.8915	109.4044
(b) 0.00000000	-0.00000083	3	0.872154272	141.0977	119.2053
0.00000000	-0.00000339	3	0.872154272	38.9023	299.2053
(c) 0.00000020	-0.00000030	4	0.855691225	-31.9919	298.6333
0.00000021	0.00000000	4	0.855691225	-148.0081	118.6332
(d) 0.00000000	0.00000000	10	0.946067469	-111.9492	157.0530
-0.00000000	-0.00001232	3	0.946067469	-68.0508	337.0530

图 3 是 ZDOS 方法在图 2(a)中沿 $2\tau = 2\tau_i$ 这条线的搜索步骤示意图. 第一步沿 $2\tau = 2\tau_i$ 这条线搜索,根据式(7)找到这条线上的局部最优点 1. 第二步则是以点 1 为起点,搜索方向为 $2\varepsilon = 2\varepsilon_{opt}$,这条线与 $2\tau = 2\tau_i$ 正交,根据式(4)得到点 2. 第三步在点 2 处沿 $2\tau = 2\tau_{opt}$ 搜索,第四步再在其正交方向上搜索. 接下来所有的搜索步骤都遵从如下规则:当前搜索的起始点是上一步的优化点,搜索方向与上一步正交,或者说是交替地沿与坐标轴平行的两个方向上搜索,不是在所有方向上搜索,搜索步骤简单,仅直接利用式(4)或式(7). 在点 5 处,由于两个方向上的导数(分母) X 和 Y 都小于 δ,所以不需要再进一步地搜索了,点 5 即为峰值点.

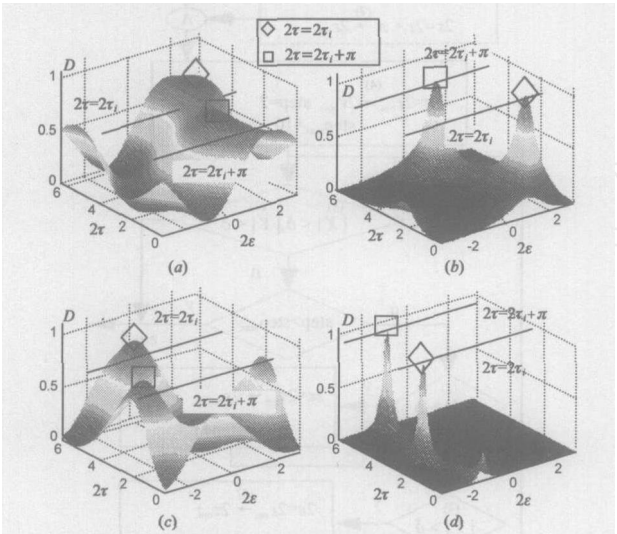


图 2 ZDOS 搜索结果示意图

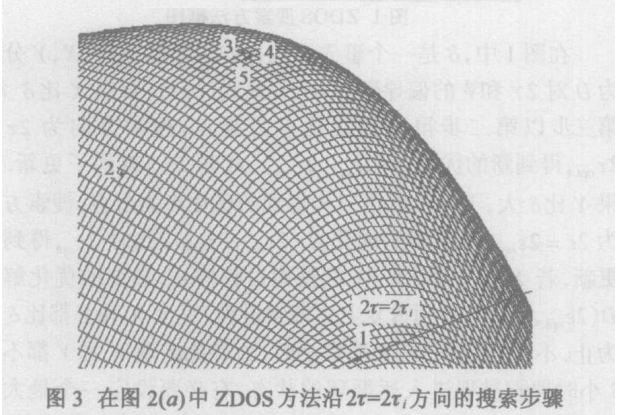


图 3 在图 2(a)中 ZDOS 方法沿 $2\tau = 2\tau_i$ 方向的搜索步骤

我们注意到,在表 1 和图 2 中峰值点有两个,见表 2,设其坐标为 $(2\varepsilon_1, 2\tau_1)$ 和 $(2\varepsilon_2, 2\tau_2)$,则可惊奇地发现它们满足式(8):

$$\begin{cases} |2\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2| = \pi \\ |2\tau_1 - 2\tau_2| = \pi \end{cases} \tag{8}$$

式(8)意味着这两个峰在 2ε 方向上分别位于两个区域:一个位于 $(-\pi/2, \pi/2)$ 内,另一个则位于 $(-\pi, -\pi/2)$ 或 $(\pi/2, \pi)$ 内. 在 2τ 方向上这两个峰的距离差则总是为 π,在 2ε 方向上这两个峰的距离和也总是为 π.

表 2 极化椭圆参数与极化坐标

	2ε(°)	2τ(°)	g_1	g_2	g_3
(a)	130.1085	289.4044	-0.214037	0.607643	0.764826
	49.8915	109.4044	-0.214037	0.607643	0.764826
(b)	141.0977	119.2053	0.379724	-0.679289	0.627994
	38.9023	299.2053	0.379724	-0.679289	0.627994
(c)	-31.9919	298.6332	0.405421	-0.744402	-0.529799
	-148.0081	118.6332	0.405421	-0.744402	-0.529799
(d)	-111.9492	157.0530	0.344205	-0.145731	-0.927516
	-68.0508	337.0530	0.344205	-0.145731	-0.927516

另外如果将其坐标值代入式(9)

$$\begin{cases} g_1 = \cos 2\varepsilon \cos 2\tau \\ g_2 = \cos 2\varepsilon \sin 2\tau \\ g_3 = \sin 2\varepsilon \end{cases} \tag{9}$$

还可以发现,这两个峰所对应的极化球的坐标 $[g_1, g_2, g_3]$ 是一样的,见表 2. 这表明它们在极化球上对应同一点. 实际上,点 $(2\varepsilon, 2\tau)$ 和点 $(\pi - 2\varepsilon, 2\tau - \pi)$ 或 $(\pi - 2\varepsilon, 2\tau + \pi)$ 都满足式(1)和(9).

为验证 ZDOS 方法的有效性和式(8),在一般情况下,我们对 1 万组随机的极化椭圆参数:$2\varepsilon_s, 2\varepsilon_i \in (-\pi/2, \pi/2)$,

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$2\tau_s, 2\tau_i \in (0, 2\pi)$, $\delta = 0.01 \sim 0.000001$, $step_{max} = 10$, $K \in (-20\text{dB}, 20\text{dB})$用 ZDOS 方法分别沿着 $2\tau = 2\tau_i$ 和 $2\tau = 2\tau_i + \pi$ 两个方向作了 Monte Carlo 仿真试验,得出了与全局搜索法得到的最优值 D_g 的相对误差的最大值 max、最小值 min、均值 *Exp* 和方差 *Var* 及实际所需的平均搜索步 s_{ave}、实际所需的最大搜索步 s_{max},见表 3. 在表 3 中,当 δ 在 0.01～0.001 范围内, s_{max} 不超过 6 步, s_{ave} 为 2～4 步. 当 $\delta < 0.0001$ 时, s_{ave} 为 3～5 步. 一般 δ 越小, $step_{max}$ 越大,则 D 接近于 D_g 的精度越高. 根据表 3,工程上通常可取 $\delta < 0.0001$,最大搜索步 $step_{max}$ 为 6. 表 3 也证实了 ZDOS 方法是有效的. 在实验中,我们还同时证实了搜索到的两组峰值坐标均满足式(10).

$$\begin{cases} 2\varepsilon_2 = \text{sign}(2\varepsilon_1)\,(\pi - |2\varepsilon_1|) \\ 2\tau_2 = 2\tau_1 + \pi \mod(2\pi) \end{cases} \tag{10}$$

表 3　一般情况下的统计数字

δ	$err = (D_g - D)/D_g$				实验步数	
	max	min	*Exp*	*Var*	s_{ave}	s_{max}
0.0100000	0.0000567	0.0000000	0.0000004	0.000000000	2.81	5
0.0010000	0.0000024	0.0000000	0.0000001	0.000000000	3.05	6
0.0001000	0.0000003	0.0000000	0.0000000	0.000000000	3.34	10
0.0000100	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.000000000	3.89	10
0.0000010	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.000000000	4.87	10

表 4　ZDOS 与 TSSC 的性能比较

	ZDOS(%)			TSSC(%)		
	Exp_1	Var_1	P_1	Exp_2	Var_2	P_2
01	0.000000015	0.000000000	0.60	0.97	0.22	2.90
02	0.000000004	0.000000000	0.50	0.91	0.27	2.50
03	0.000000004	0.000000000	0.70	0.72	0.18	2.00
04	0.000000004	0.000000000	0.70	1.01	0.23	3.10
05	0.000000005	0.000000000	0.80	0.83	0.19	2.70
06	0.000000005	0.000000000	0.90	0.79	0.14	2.70
07	0.000000007	0.000000000	1.00	0.91	0.20	2.70
08	0.000000005	0.000000000	0.60	1.14	0.31	3.40
09	0.000000006	0.000000000	1.30	0.75	0.13	2.10
10	0.000000005	0.000000000	0.90	1.10	0.23	3.60

另外,我们还用 1 万组随机参数,且在 $\delta = 0.00005$, $step_{max} = 6$ 的条件下,对 TSSC 和 ZDOS 两种方法进行了比较,见表 4,其中 P_1 为 ZDOS 方法求得的 D_{ZDOS} 与 D_g 的相对误差超过 0.000000001 百分数, P_2 为用 TSSC 方法求得的 D_{TSSC} 与 D_g 的相对误差超过 0.1 百分数,见式(11). 从表 4 可看到,ZDOS 找到了所有的最优点,且 ZDOS 的精度明显比 TSSC 好得多. TSSC 仍有不到 4 %的 D_{TSSC} 与 D_g 的相对误差超过 10 %.

$$P_1 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[1, \text{if}\left|\frac{D_g - D_{ZDOS}}{D_g}\right| > 0.000000001\right] \times 100\ \%$$
$$P_2 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left[1, \text{if}\left|\frac{D_g - D_{TSSC}}{D_g}\right| > 0.1\right] \times 100\ \%,\ N = 1000 \tag{11}$$

5　结论

本文通过仔细分析基于极化椭圆参数的干扰环境下极化球面上的优化接收信干噪比参量等式,提出了一种新的称为正交向零导数搜索极化优化方法. 该方法的关键在于:找到了两条特殊的基线($2\tau = 2\tau_i, 2\tau = 2\tau_i + \pi$),全局最优点就在该基线接近,然后计算该基线上的局部最优点,接下来在该点上沿其正交方向进行搜索,搜索准则是该方向上的导数(实际上是导数的分子)小于一个很小的正数,而且搜索过程不是在所有方向上进行穷举法搜索最小的导数,而只需简单地做一步局部最优计算而作为下一次搜索的起点,以后重复两个正交方向上的局部最优计算,直至两个方向上的导数都很小时即停止搜索. ZDOS 方法简单地通过两个正交方向搜索就能找到最优点的基础是式(1)的峰值有且仅有两个,且满足式(8)和(10).

在仿真试验中,详细地描述了搜索过程. 经过大量试验,给出了搜索准则中门限参数 δ 的范围及最大搜索步 $step_{max}$ ($\delta < 0.0001$, $step_{max} = 6$). 结果表明,ZDOS 方法是有效的,基本上只需几步(4～6 步)计算后就找到了全局最优点,而且精度也很高. TSSC 方法只能以 96 %的概率找到最优值. 当然 ZDOS 方法比 TSSC 方法需要更多的运算时间,搜索过程中需要计算导数,搜索步数也多些. 如果要求速度快,且对精度要求不高,则可用 TSSC 方法. 本文另外还分析了式(1)的一些图形性质.

参考文献:

[1] Stapor D P. Optimal receive antenna polarization in the presence of interference and noise[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1995, 43(5): 473 - 477.

[2] 王雪松,肖顺平,曾勇虎,庄钊文,郭桂蓉. 极化轨道约束下的最优极化(一)[J]. 微波学报, 1997, 13(1): 33 - 42.
WANG Xue-song, XIAO Shun-ping, ZENG Yong-hu, ZHUANG Zhao-wen, GUO Gui-rong. Optimal polarization with the constraint on polarization track(1)[J]. JOURNAL OF MICROWAVES, 1997, 13(1): 33 - 42. (in Chinese)

[3] 王雪松,肖顺平,曾勇虎,庄钊文. 极化轨道约束下的最优极化(二)[J]. 微波学报, 1997, 13(3): 216 - 223.
WANG Xue-song, XIAO Shun-ping, ZENG Yong-hu, ZHUANG Zhao-wen. Optimal polarization with the constraint on polarization track(2)[J]. JOURNAL OF MICROWAVES, 1997, 13(3): 216 - 223. (in Chinese)

[4] Xue-song WANG, Shun-ping XIAO, Yong-hu ZENG, Hua-min TAO. Optimal receive polarizations with the constraint of polarization tracks in the presence of interference and noise[A]. Aerospace and Electronics Conference, 1997. NAECON 1997, Proc of the IEEE 1997 National [C]. 1997, 2: 926 - 930.

[5] 王雪松,庄钊文,肖顺平,曾勇虎. 极化信号的优化接收理论:完全极化情形[J]. 电子学报, 1998, 26(6): 42-46.
WANG Xue-song, ZHUANG Zhao-wen, XIAO Shun-ping, ZENG Yong-hu. The theory on optimal reception of polarized signals: The purely polarized case[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(6): 42 - 46. (in Chinese)

[6] 王雪松,徐振海,代大海,肖顺平,庄钊文. 干扰环境中部分极化信号的最佳滤波[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(4): 593 - 597.
WANG Xue-song, XU Zhen-hai, DAI Da-hai, XIAO Shun-ping,

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ZHUANG Zhao-wen. Optimal filtering of partially polarized signals in the Interference Background[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2004,26(4):593 - 597. (in Chinese)

[7] 王雪松,庄钊文,肖顺平,郭桂蓉. 极化信号的优化接收理论:部分极化情形[J]. 电子科学学刊,1998,20(4):468 - 473.
WANG Xue-song, ZHUANG Zhao-wen, XIAO Shun-ping, GUO Gui-rong. The theory on optimal reception of polarized signals: The partially polarized case[J]. Journal of Electronics,1998,20(4):468 - 473. (in Chinese)

[8] 王雪松,肖顺平,陈志杰,庄钊文. 部分极化情况下 SINR 极化滤波器性能研究[J]. 应用科学学报,1999,17(2):177 - 182.
WANG Xue-song, XIAO Shun-ping, CHEN Zhi-jie, ZHUANG Zhao-wen. Study on characteristics of SINR polarization filter in the partially polarized case[J]. JOURNAL OF APPLIED SCIENCES,1999,17(2):177 - 182. (in Chinese)

[9] 王雪松,肖顺平,庄钊文. 极化轨道上 SINR 滤波器的通带性能研究[J]. 电子科学学刊,2000,22(1):61 - 67.
WANG Xue-song, XIAO Shun-ping, ZHUANG Zhao-wen. Study on pass band characteristics of SINR filter on polarization tracks[J]. Journal of Electronics,2000,22(1):61 - 67. (in Chinese)

[10] 王雪松,肖顺平,庄钊文,魏保华. SINR 极化滤波器通带性能研究[J]. 微波学报,2000,16(1):29 - 37.
WANG Xue-song, XIAO Shun-ping, ZHUANG Zhao-wen, WEI Bao-hua. Investigation on band characteristics of SINR polarization filter [J]. JOURNAL OF MICROWAVES,2000,16(1):29 - 37. (in Chinese)

[11] 王雪松,汪连栋,肖顺平,庄钊文. 自适应极化滤波器的理论性能分析[J]. 电子学报,2004,32(8):1326 - 1329.
WANG Xue-song, WANG Lian-dong, XIAO Shun-ping, ZHUANG Zhao-wen. Theoretical performance analysis of adaptive polarization filters[J]. Acta Electronica Sinica,2004,32(8):1326 - 1329. (in Chinese)

[12] 杨运甫,陶然,王越,杜自成,单涛. 基于椭圆参数的最优接收极化[J]. 雷达科学与技术,2004,2(1):69 - 72.
Yun-fu YANG, et al. Optimal receive polarization based on the pol-ellipse parameters[J]. Radar Science and Technology,2004,2(1):69 - 72. (in Chinese)

[13] Yun-fu YANG, Ran TAO, Yue WANG. A new SINR equation based on the polarization ellipse parameters[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation,2005,53(4):1571-1577.

作者简介:



杨运甫 男,1963 年生于安徽太湖,1983 年和 2002 年分别在西安电子科技大学信息处理专业和安徽大学通信专业获学士与硕士学位,现为解放军炮兵学院副教授,北京理工大学在读博士生,研究方向为雷达极化信息处理和通信信号处理.



陶 然 男,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,1964 年出生,解放军电子工程学院学士,哈尔滨工业大学硕士、博士,北京理工大学博士后,曾在 The University of Michigan at Ann Arbor 任访问教授一年,研究方向信息安全与对抗理论与技术,通信系统理论与技术,信息处理理论与技术,获教育部"高校青年教师奖","中国兵工青年科技奖",另获部级二等奖 2 项,部级三等奖 4 项,被三大检索收录论文 90 余篇,以第一作者出版著作 4 部,兼任 IEEE 高级会员,中国电子学会青年工作委员会副主任、无线电定位技术分会委员、中国雷达行业协会副理事长、《兵工学报》常务编委、总装综合电子战专家组特邀专家、北京市科学技术奖评委、国家 242 信息安全重大专项评审组专家.



王 越 男,江苏丹阳人,教授,北京理工大学名誉校长,中国兵工学会副理事长,国防科工委专家咨询委员会委员,863 计划国家安全领域专家组顾问,总装备部科技委顾问,《中国科学》、《科学通报》、《兵工学报》编委,长期从事信息对抗理论与技术研究工作,曾担任过许多大型火控雷达系统的总设计师和行政指挥,获机电部科技进步特等奖、国家科技进步一等奖、国防科学技术科技进步一等奖、光华基金一等奖、高等教育国家级教学成果一等奖、何梁何利基金科学与技术进步奖,曾被授予兵器工业功勋奖、全国教育系统劳动模范,1991 年当选中国科学院院士,1994 年当选中国工程院院士.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net