

极化空时联合处理应用于相控阵雷达分析

饶妮妮¹, 贾海洋¹, 程宇峰², 邱朝阳²

(1. 电子科技大学生命科学与技术学院 成都 610054; 2. 雷达与电子设备研究院 江苏 无锡 214063)

【摘要】通过理论分析和仿真实验,分析了非高斯杂波环境下相控阵雷达采用极化空时联合广义似然比检测(PST-GLR)算法和局域化的极化空时联合广义似然比检测(PSTL-GLR)算法的目标探测能力。结果表明,PST-GLR算法具有较强的抗非高斯杂波的能力,但它在目标探测过程中需要大量的回波数据估计杂波和噪声的协方差矩阵。尽管PSTL-GLR算法在目标探测过程中所需的回波数据量较小,但其探测能力在非高斯杂波环境下却严重下降,失去了有效性。

关键词 广义似然比检测; 局域化; 非高斯杂波; 极化; 空时处理

中图分类号 TN958.92

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.05.004

Analysis of Joint Polarization-Space-Time Processing Methods with Applications in Phased Array Radars

RAO Ni-ni¹, JIA Hai-yang¹, CHENG Yu-feng², and QIU Chao-yang²

(1. School of Life Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Institute of Radar and Electronic Equipments Wuxi Jiangsu 214063)

Abstract Most of previous conclusions on the target detection ability increase of phased array radars by utilizing the joint polarization-space-time processing methods were obtained under the environment of Gaussian clutters. The real clutter environments are much more complex than that showed by Gaussian clutter models. By means of the theoretical analysis and the simulation experiments, the target detection ability of phased array radar with the polarization-space-time generalized likelihood ratio (PST-GLR) algorithm and joint polarization-space-time localize GLR (PSTL-GLR) algorithm are analyzed under the environment of non-Gaussian clutters. The results show that the PST-GLR algorithm is robust against non-Gaussian clutters, but it requires large numbers of echo data to estimate the covariance matrix of clutters and noises in the process of target detection. Although PSTL-GLR algorithm requires less echo data in the process of target detection, its target detection ability degraded seriously so that it is invalidation under the environment of non-Gaussian clutters.

Key words generalized likelihood ratio; localization; non-Gaussian clutter; polarization; space-time processing

在20世纪中叶,文献[1]阐述了极化理论及其测量技术。文献[2-3]提出了基于估计杂波极化状态的经典极化滤波技术。文献[4-5]提出将广义似然比检测与估计目标极化状态相结合的自适应极化处理结构。针对空时自适应处理问题,在高斯噪声环境下,文献[6]根据最大似然比导出了自适应最佳处理器结构。文献[7-8]对如何降低空时二维处理的运算量问题做了深入的研究。有关空时自适应方法更全面的分析和评价详见文献[9-11]。上述文献涉及的方法在处理相对简单的杂波环境(如高斯分布)时,可以使相控雷达取得较好的目标探测结果。

长期以来,极化滤波技术和空时自适应技术一直是独立发展的,若要充分利用雷达回波中的信息,

需要将两者相结合。文献[12]提出了极化空时联合的最大似然比检测算法(PST-GLR),虽然该算法只依赖于输入数据协方差矩阵和目标极化向量的概率密度函数,但需要大量的训练数据来弥补在估计杂波协方差矩阵时产生的探测误差,在实际应用中难以获得大量的训练数据,影响了该算法的探测性能。为了解决训练数据有限的问题,文献[8]引入了局域化的处理方法,提高了数据的利用效率。文献[13]又在文献[8]的基础上提出了局域化极化空时联合最大似然比检测算法(PSTL-GLR),该算法在模拟的多峰高斯杂波环境和有限的训练数据条件下,能够得到近于最优的探测性能,同时提高了计算效率。

然而,真实的雷达杂波环境并非如此理想,绝

收稿日期: 2008-10-09; 修回日期: 2009-05-21

基金项目: 航空科学基金(20092080016)

作者简介: 饶妮妮(1963-), 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事信号与信息处理及其应用等方面的研究。

大多数的地物杂波和海浪杂波的统计特性都极为复杂,其相位和幅度都是随机的,需要用一个较为合理的数学模型表示杂波的概率分布特性。已有研究表明,瑞利分布和K分布是现阶段能够较好地模拟实际杂波的非高斯杂波模型^[14]。因此,本文拟在这两种非高斯杂波环境下,研究PST-GLR算法和PSTL-GLR算法应用于相控阵雷达的性能。

1 数据模型^[13]

假设雷达天线接收端由 N_s 个阵元组成,有两个正交的水平极化通道 H 和垂直极化通道 V 极化天线传感器,可以同时在水平和垂直极化方向上接收雷达回波。每个传感器接收 N_t 个相干脉冲,因此,每次抽样后的输出可用一个 $N_t \times N_s$ 维的矩阵表示。如果将每个矩阵按行排列起来,得到一个 $N_t N_s \times 1$ 的行向量,则对目标的检测问题转变为一个二元假设检验问题。设 H_1 代表目标存在; H_0 代表目标不存在,只包含有杂波和噪声。把接收到的待检测单元的数据记为 \mathbf{x}_p ,称为原始数据;同时假设存在 K 个不含目标信号且与 \mathbf{x}_p 有相同杂波协方差矩阵的数据 $\mathbf{x}_s(k)$, $k=1,2,\dots,K$,称为训练数据^[15]。

在 H_1 条件下,原始数据包含目标信号,即有:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_p = \mathbf{S}\mathbf{a}_0 + \mathbf{c} + \mathbf{n} \\ \mathbf{S} = \begin{bmatrix} s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & s \end{bmatrix} \\ \mathbf{a}_0 = \begin{bmatrix} a_H \\ a_V \end{bmatrix} \\ \mathbf{c} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_H \\ \mathbf{c}_V \end{bmatrix} \\ \mathbf{n} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_H \\ \mathbf{n}_V \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

式中 a_H 和 a_V 为未知的复常数,表示目标回波的幅度、相位和极化信息; s 为信号向量,表示在 H 和 V 方向上时域和空域的目标回波信号; \mathbf{c}_H 和 \mathbf{c}_V 为杂波成分,本文设为非高斯随机向量,其均值为零,协方差为 \mathbf{C}_{HH} 和 \mathbf{C}_{VV} 。其中 \mathbf{C}_{HH} 和 \mathbf{C}_{VV} 除了幅度不同外,其他均相同。因此可得 \mathbf{c} 的协方差表达式为 $\mathbf{J} \otimes \mathbf{C}_{HH}$,其中 \otimes 代表Kronecker乘积,定义为:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{\gamma}\delta \\ \sqrt{\gamma}\delta & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 \mathbf{J} 定义了杂波的平均极化状态; δ 和 γ 分别为水平和垂直极化通道的相关系数和功率比; \mathbf{n}_H 和 \mathbf{n}_V

为接收到的高斯噪声,其均值为零,方差为 $\sigma_n^2 \mathbf{I}_N$,其中 $N=N_t N_s$ 。最终得到的原始数据的协方差矩阵为:

$$\mathbf{R} = \mathbf{J} \otimes \mathbf{C}_{HH} + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{2N} \quad (3)$$

在 H_0 条件下,原始数据为:

$$\mathbf{x}_p = \mathbf{c} + \mathbf{n} \quad (4)$$

式中 \mathbf{x}_p 为零均值、方差为 \mathbf{R} 的高斯随机向量。训练数据为:

$$\mathbf{x}_s(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_H(k) + \mathbf{n}_H(k) \\ \mathbf{c}_V(k) + \mathbf{n}_V(k) \end{bmatrix} \quad k=1,2,\dots,K \quad (5)$$

式中 K 为有效单元数。训练数据 $\mathbf{x}_s(k)$ 与 H_0 条件下的原始数据有相同的分布。

2 理论分析

2.1 PST-GLR算法结构及其目标探测概率

根据文献[6]可得PST-GLR算法的最优化权值为:

$$\mathbf{w}_o = k\mathbf{R}^{-1}\mathbf{S}\mathbf{a}_o \quad (6)$$

式中 k 为任意常数。该算法的最终输出结果为:

$$z_o = \mathbf{w}_o^H \mathbf{x}_p \quad (7)$$

为确定目标是否存在,将式(7)取模求平方后,与一个确定的门限值做比较,则有:

$$\eta = \begin{cases} > \eta_0 \\ < \eta_0 \end{cases} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} \quad (8)$$

式中 $\eta_0 = -\ln(P_F)\sigma_o^2$, $\sigma_o^2 = \mathbf{w}_o^H \mathbf{R}\mathbf{w}_o$, P_F 为恒虚警概率。在目标信号确定存在的情况下,PST-GLR算法的探测概率为:

$$P_{D|a_o} = 1 - \exp(-\gamma) \int_0^{P_F} \exp(-t) I_0(2\sqrt{\gamma t}) dt \quad (9)$$

式中 $\gamma = \frac{|\mathbf{w}_o^H \mathbf{S}\mathbf{a}_o|^2}{\mathbf{w}_o^H \mathbf{R}\mathbf{w}_o}$; $I_0(\cdot)$ 为第一类零阶修正贝塞尔函数。

2.2 PSTL-GLR算法及其目标探测概率分析

设局域化单元为 $N_{sl} \times N_{tl}$ 。根据文献[3]可知,PSTL-GLR算法的统计检测公式为:

$$\eta = \frac{\mathbf{x}_{pl}^H \hat{\mathbf{G}}_l^{-1} \mathbf{S}_l (\mathbf{S}_l^H \hat{\mathbf{G}}_l^{-1} \mathbf{S}_l)^{-1} \mathbf{S}_l^H \hat{\mathbf{G}}_l^{-1} \mathbf{x}_{pl}}{1 + \mathbf{x}_{pl}^H \hat{\mathbf{G}}_l^{-1} \mathbf{x}_{pl}} \begin{matrix} > \eta_0 \\ < \eta_0 \end{matrix} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} \quad (10)$$

式中 $\hat{\mathbf{G}}_l = \sum_{k=1}^K \mathbf{x}_{sl}(k) \mathbf{x}_{sl}^H(k)$; $\mathbf{S}_l = \begin{bmatrix} s_l & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & s_l \end{bmatrix}$; K 为训练数据向量的数量; s_l 、 \mathbf{x}_{pl} 和 \mathbf{x}_{sl} 分别为对 s 、 \mathbf{x}_p 和 $\mathbf{x}_s(k)$ 做二维傅里叶变换,再局域化处理后的数据单元。PSTL-GLR算法的探测概率为:

$$P_{D/a_o} = \int_0^1 P_{D/a_o,\rho} f_\rho(\rho) d\rho \quad (11)$$

其中:

$$P_{D/a_o,\rho} = 1 - \eta_0(1 - \eta_0)^{K-2N_t+1} \times \sum_{i=1}^{K-2N_t+1} \binom{K-2N_t+2}{i+1} \times \left(\frac{\eta_0}{1-\eta_0}\right)^i \exp\{-\beta_i \rho(1-\eta_0)\} \times \sum_{m=0}^{i-1} \frac{1}{m!} \{\beta_i \rho(1-\eta_0)\}^m \quad (12)$$

$$f_\rho(\rho) = \frac{K!}{(2N_t-3)!(K-2N_t+2)!} \times \frac{1}{(1-\rho)^{2N_t-3} \rho^{K-2N_t+2}} \quad (13)$$

$$\beta_i = \left| (S_i^H R_i^{-1} S_i)^{1/2} a_o \right|^2 = a_o^H (S_i^H R_i^{-1} S_i) a_o \quad (14)$$

$$R_i = E\{x_{st}(k)x_{st}^H(k)\} \quad (15)$$

虚警概率为:

$$P_F = \frac{(1-\eta_0)^{K-2N_t+1}}{(K-2N_t)!} \sum_{i=1}^2 (K-2N_t+2-i)! \eta_0^{2-i} \quad (16)$$

3 仿真实验与分析

3.1 仿真参数选择

假设相控阵雷达系统由 N_s 个双通道的线性阵构成。仿真中设 $N_s=10$ 、 $N_t=16$ ，虚警概率 $P_F=10^{-5}$ 。杂波模型选择瑞利杂波和K杂波，其概率密度函数如下:

(1) 瑞利杂波为:

$$p(u) = \begin{cases} \frac{u}{\sigma_c^2} \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma_c^2}\right) & u > 0 \\ 0 & u < 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中 杂波功率 $\sigma_c^2 = 2v\alpha^2$ 。

(2) K杂波为:

$$f(u; \alpha, v) = \frac{2}{\alpha \Gamma(v)} \left(\frac{u}{2\alpha}\right)^v K_{v-1}\left(\frac{u}{\alpha}\right) \quad (18)$$

式中 v 为形状参数, $v > 0, u > 0$; α 为标度参数; $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数; $K_v(\cdot)$ 为第二类修正贝塞尔函数。

目标模型采用文献[8]的模型结构:

$$s = s_s^T \otimes s_t \quad (19)$$

$$s_t = [1 \exp(i2\pi f_{st}) \cdots \exp(i2\pi(N_t-1)f_{st})]^T \quad (20)$$

$$s_s = [1 \exp(i2\pi f_{ss}) \cdots \exp(i2\pi(N_s-1)f_{ss})]^T \quad (21)$$

式中 选择 $f_{st} = 0.15, f_{ss} = 0.0$ 。

目标的极化向量为:

$$a_o = (S^H \hat{R}^{-1} S)^{-1} S^H \hat{R}^{-1} x_p \quad (22)$$

$$\hat{R} = \sum_{k=1}^K x_s(k)x_s^H(k) \quad k=1,2,\dots,K \quad (23)$$

输入信噪比SCNR为:

$$SCNR = \frac{|a_o|^2}{\sigma_n^2 + \sigma_c^2} \quad (24)$$

与常规的信噪比定义不同, SCNR属于归一化信噪比。

在仿真过程中, 假设H通道数据的相位超前V通道数据 90° , 并且两通道的杂波平均功率相同, 即 $\gamma=1$ 。杂波的极化度(DP)定义为式(2)中的 $|\delta|$, 其值设定为0.99。两种杂波模型的杂波功率为 $10\lg(\sigma_c^2/\sigma_n^2) = 50$ dB, 即杂波噪声功率比CNR=50 dB, 仿真时取 $\sigma_c^2=1$ 。

3.2 仿真结果与分析

本文分别在两种非高斯杂波环境下, 对PST-GLR算法的目标探测性能进行仿真, 并与多峰高斯杂波环境下的仿真进行比较, 比较结果如图1和图2所示。虚警概率 $P_F=10^{-5}$ 。

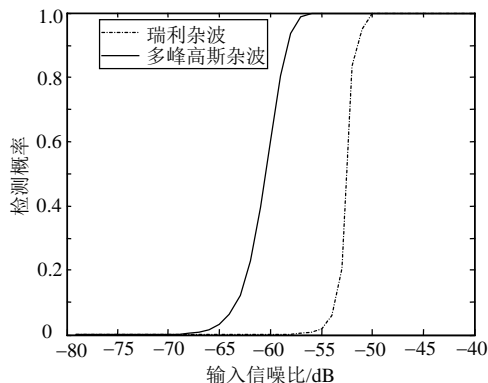


图1 瑞利杂波和多峰高斯杂波PST-GLR性能比较

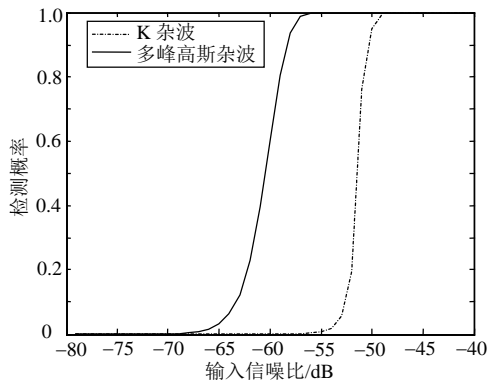


图2 K杂波和多峰高斯杂波PST-GLR性能比较

从图1和图2可看出, 在多峰高斯杂波环境下, PST-GLR算法输入信噪比SCNR=-55 dB时, 其检测概率能够达到1, 具有较强的目标探测性能; 在两种非高斯杂波环境下, 输入信噪比约为SCNR=-50 dB时, 其检测概率也能够达到1。因此, 在高斯和非高斯两种杂波环境, PST-GLR算法的目标探测性能差距并不大, 在5 dB左右。因此认为PSTL-GLR算法对于非高斯杂波具有较好的刚性。然而, 该算法良好

的探测性能是用大量回波训练数据估计杂波和噪声的协方差矩阵的条件得到的。在实际应用中, 如此大量的回波训练数据很难实时获得, 限制了该算法的实际应用。

进一步, 本文又分别在非高斯杂波环境下, 对 PSTL-GLR 算法的目标探测性能进行了仿真, 并与多峰高斯杂波环境的仿真结果进行比较, 比较结果分别如图3和图4所示。虚警概率 $P_F=10^{-5}$ 。

从图3和图4可看出, 在多峰高斯杂波环境下, PSTL-GLR 算法在输入信噪比约为 SCNR=-40 dB 时, 检测概率达到1, 具有较强的探测性能; 而在非高斯杂波环境下, 该算法的探测性能严重下降。在瑞利杂波环境下, 只有把输入信噪比提高到 SCNR=-10 dB 时, 其检测概率才能达到1; 在 K 杂波环境下, 只有把输入信噪比提高到约 -4 dB, 其探测概率才能接近1。而这两种信噪比条件对实际的雷达系统均比较苛刻, 难以实现。本文认为非高斯杂波的时变和不稳定性是导致 PSTL-GLR 算法的目标探测能力严重下降的主要因素。

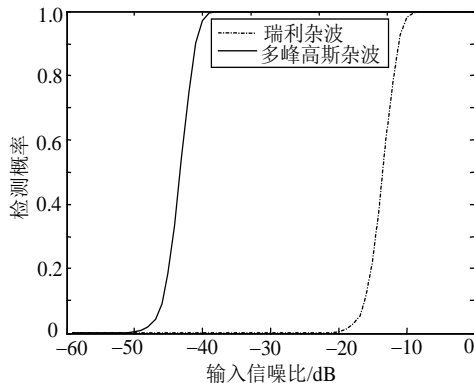


图3 瑞利杂波和多峰高斯杂波 PSTL-GLR 性能比较

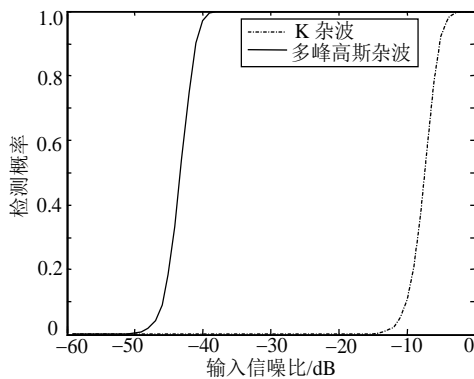


图4 K 杂波和多峰高斯杂波 PSTL-GLR 性能比较

4 讨论与结论

早期有关极化空时联合处理方法探测雷达目标能力的结论大多是在高斯杂波或者多峰高斯杂波环

境下得到的。然而, 真实的杂波环境远远比这两种杂波环境复杂。因此, 本文选择了两种具有代表性的非高斯模型——瑞利分布和 K 分布模拟雷达的非高斯杂波环境; 通过仿真实验, 分析了 PST-GLR 算法和 PSTL-GLR 算法的目标探测性能, 并与多峰高斯杂波环境下的结果进行了比较。研究表明, PST-GLR 算法具有较强的抗非高斯杂波的能力, 但在检测过程中, 需要大量的回波训练数据估计杂波和噪声的协方差矩阵。尽管 PSTL-GLR 算法在目标检测过程中所需的回波数据量较小, 但是, 其探测能力在非高斯杂波环境下却严重下降, 几乎失去有效性。因此, 发展适合于非高斯环境下具有较强目标探测能力的极化空时联合处理方法, 对于提高雷达系统整机性能至关重要, 也是今后研究工作的一个重要方向。

参 考 文 献

- [1] BORN M, WOLF E. Principles of optics[M]. [S.l.]: Pergamon Press, 1975.
- [2] GIULI D. Polarization diversity in radars[J]. Proceedings of the IEEE. 1986, 74(2): 245-269.
- [3] GHERARDELLI M, GIULI D, FOSSI M. Suboptimum adaptive polarization cancellers for dual-polarization radars[J]. IEE Proceedings. 1988, 135(1): 60-72.
- [4] WANG H, LEE C J. Adaptive array processing for real-time airborne radar detection of critical mobile targets[C]//IEEE Symp of Adaptive Antenna Systems. [S.l.]: IEEE, 1992.
- [5] PASTINA D, LOBARDO P, PEDICINI V. Adaptive polarimetric target detection with coherent radar[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 37(4): 1207-1220.
- [6] BRENNAN L E, REED I S. Theory of adaptive radar[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1973, AES-9(2): 237-252.
- [7] KLEMM R. Suoptimum clutter suppression for airborne phased array radar[C]//IEE Radar Conf. London: IEEE, 1982.
- [8] WANG H, CAI L. On adaptive spatial-temporal processing for airborne surveillance radar system[J]. IEEE Transaction on Aerospace Electronic Systems, 1994, 30(3): 660-670.
- [9] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
WANG Y L, PENG Y L. Space time adaptive signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [10] 王永良, 李天泉. 机载雷达空时自适应信号处理技术与回顾与展望[J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, 3(2): 271-275.
WANG Y L, LI T Q. Overview and outlook of space time adaptive signal processing for airborne radar[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2008, 3(2): 271-275.

(下转第675页)

参 考 文 献

- [1] TELATAR I E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels[J]. *Eur Trans Telecom*, 1999, 10(6): 585-595.
- [2] 付卫红, 杨小牛, 刘乃安, 等. 宽带无线通信中的MIMO系统[J]. *电子科技大学学报*, 2007, 36(2): 176-178.
FU Wei-hong, YANG Xiao-niu, LIU Nai-an, et al. MIMO systems in wideband wireless[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2007, 36(2): 176-178.
- [3] WOLNIANSKY P W, FOSCHINI G J, GOLDEN G D, et al. V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel[C]//*Proceedings of URSI International Symposium on Signals, Systems and Electronics*. Italy: IEEE, 1998: 295-300.
- [4] AHMED D K, AMIR S, JEAN P C, et al. New list sphere decoding and iterative synchronization algorithms for MIMO-OFDM detection with LDPC FEC[J]. *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 2008, 57(6): 3510-3524.
- [5] YANG Yi-jin, ZHAO Chun-ming, ZHOU Peng, et al. MIMO detection of 16QAM signaling based on semidefinite relaxation[J]. *IEEE Transaction on Signal Processing*, 2007, 14(11): 797-799.
- [6] WANG Yun, LIU Shou-yin. A new high rate differential space-time-frequency modulation for MIMO-OFDM[J]. *Journal of Electronic Science and Technology of China*, 2007, 5(3): 193-198.
- [7] WUBBEN D, BOHNKE R, Kuhn V, et al. Near maximum likelihood detection of MIMO systems using MMSE-based lattice reduction[C]//*Proceedings of International Conference on Communications*. Paris: IEEE, 2004: 798-802.
- [8] MICCIANCIO D, GOLDWASSER S. Complexity of lattice problems: a cryptographic perspective[M]. Norwell: Kluwer Academic Publishers. 2002: 180-190.
- [9] SCHNOOR C P, EUCHNER M. Lattice basis reduction: improved practical algorithms and solving subsets sum problems[J]. *Mathematical Programming*, 1994, 66(3): 181-191.
- [10] WINDPASSINGER C, FISCHER R F H. Low-complexity near maximum-likelihood detection and precoding for MIMO systems using lattice reduction[C]//*Proceedings of Information Theory Workshop*. Paris: IEEE, 2003: 345-348.
- [11] LENSTRA A K, LENSTRA H W, Lovasz L. Factoring polynomials with rational coefficients[J]. *Math Ann* 1983, 261(4): 513-534.
- [12] YING Hung-gan, WAI How Mow. Complex lattice reduction algorithms for low-complexity MIMO detection [C]//*Proceedings of Global Telecommunication Conference*. St. Louis: IEEE, 2005: 2953-2957.

编辑 张俊

(上接第669页)

- [11] TANG B, WANG X G, CHEN K S. Improved multistage wiener filters in nonhomogeneous clutter environments[J]. *Journal of Electronic Science and Technology of China*, 2008, 6(1): 75-78.
- [12] PARK H R, LI J, WANG H. Polarization-space-time domain generalized likelihood ratio detection of radar targets[J]. *Signal Process*, 1995, 41: 153-164.
- [13] PARK H R, WANG H. Adaptive polarization-space-time domain radar target detection in inhomogeneous clutter environments[J]. *IEE Proceedings Radar, Sonar and Navig*, 2006, 153(1): 35-43.
- [14] 刘力东, 吴顺君, 孙晓闻. 复合高斯杂波中相干雷达极化自适应检测算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(2): 326-329.
LIU L D, WU S J, SUN X W. Polarimetric adaptive detection algorithm in compound-Gaussian clutter with coherent radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(2): 326-329.
- [15] 蒋咏梅, 陆铮. 相关非高斯分布杂波的建模与仿真[J]. *系统工程与电子技术*, 1999, 21(10): 27-30.
JIANG Y M, LU Z. Modeling and simulation of correlated non-Gaussian foliage background radar clutter[J]. *System Engineering and Electronics*, 1999, 21(10): 27-30.

编辑 黄莘