

一种改进型二维恒虚警参考窗

黄红平, 张晓玲

(电子科技大学电子工程学院, 四川 成都 610054)

: 对于环境复杂的海面, 雷达回波中包含了目标回波、海杂波、气象杂波以及干扰信号等。由于海杂波特性随时间变化存在较大的随机性, 因此预警雷达在强杂波环境下探测微弱目标时, 海杂波抑制成为一个关键环节。恒虚警率 (CFAR) 处理技术是减小海杂波影响的一项有效措施。本文从海面雷达回波特性入手, 分析了海杂波的空间幅度特性, 提出一种改进的二维恒虚警参考窗结构, 并利用地基预警雷达的海杂波实测数据验证了该参考窗的有效性。

: 预警雷达; 微弱目标检测; 海杂波; 杂波抑制; 恒虚警率

: TN957. 52

: B

: 1673 - 5048 (2011) 01 - 0034 - 04

A Modified 2D-CFAR Reference Window

HUANG Hongping, ZHANG Xiao-ling

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Radar echo of sea complex environments contains the echo of target, sea clutter, weather clutter and jamming signals. The sea clutter characteristics changed with time has more randomness, the sea clutter suppression becomes a key step, while the early warning radar detects the dim target in strong clutter environments. Constant - false - alarm rate (CFAR) processing is an effective method to suppress sea clutter. In this paper, the characteristics of spatial magnitude of sea clutter is analyzed from radar echo characteristics, then a modified 2D reference window for CFAR detector is proposed. Performance of this reference window is assessed by the actual measurement from the early warning radar.

Key words: early warning radar; dim target detection; sea clutter; clutter suppression; constant-false-alarm rate

0 引言

在强杂波下检测微弱目标的课题研究中, 对杂波的处理是非常重要的一个步骤, 尤其是对海杂波的处理成为一个非常棘手的问题。杂波抑制的信号处理方式主要有: 对消处理、恒虚警率 (CFAR) 处理等。由于海杂波和海上气象杂波具有一定的多普勒谱宽, 因此动目标显示 (MTI) 等常规

杂波处理性能不佳, 对消处理后会存在杂波剩余, 如不进一步处理会导致雷达的虚警率大大提高。而恒虚警率 (CFAR) 处理技术是减小海杂波影响的一项有效措施^[1-2]。本文给出了两种典型 CFAR 检测器的原理, 通过分析海杂波空间幅度特性, 指出传统二维 CFAR 参考窗需改进之处, 提出了一种新的改进型二维 CFAR 参考窗结构, 最后利用某单位提供的预警雷达海杂波实测数据, 验证了改进型参考窗的有效性。

1 典型 CFAR 检测器

1.1 单元平均恒虚警 (CA - CFAR) 检测器^[3]

CA - CFAR 是均值 (ML) 类 CFAR 处理方法之

: 2010 - 04 - 21

: 航空科学基金项目 (20090180001)

: 黄红平 (1984 -), 男, 江西新余人, 硕士研究生, 研究方向是雷达微弱目标检测技术等信号处理领域。

一,它在均匀杂波背景下具有良好的检测性能。CA - CFAR的判决门限是由被检测点前后沿邻近参考单元计算得到的平均杂波包络估计与标称化 T 值决定。为了防止目标能量泄露到参考单元影响杂波估计,可将与检测单元最邻近的单元作为保护单元。其方框图如图 1 所示。

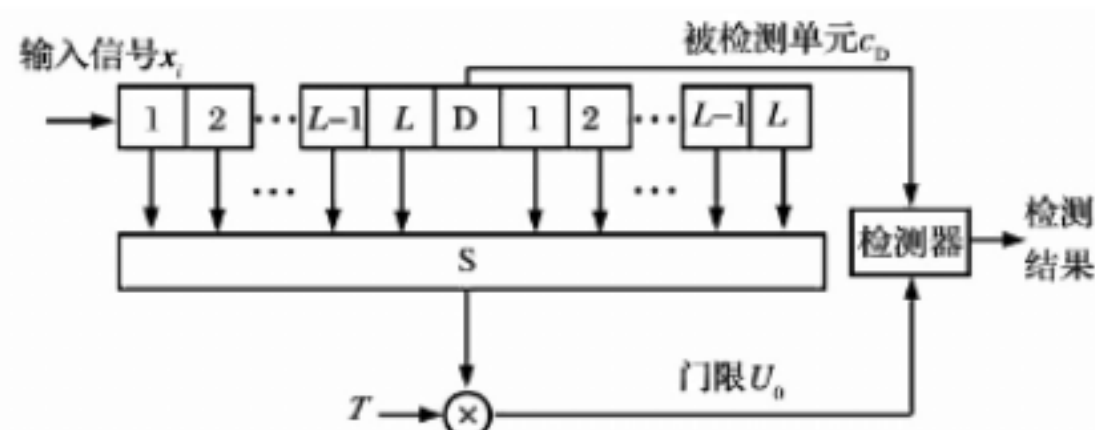


图 1 CA - CFAR 处理器原理图

图中,输入信号被送到由 $(2L + 1)$ 个延迟单元构成的延迟线上, D 是被检测单元, D 的两侧各 L 个参考单元。将所有单元中的值求和后再平均就可以估计最终的判决门限表达式如下:

$$U_0 = \frac{T}{2L} \sum_{i=1}^{2L} x_i \quad (1)$$

1.2 有序统计量恒虚警 (OS - CFAR) 检测器^[4-5]

在多目标环境或者非均匀杂波背景下, CA - CFAR 的检测性能会明显下降。为了提高恒虚警检测器的检测能力, Rohling 提出了一种有序统计量恒虚警检测器, 简称为有序恒虚警检测器 (OS - CFAR)。OS - CFAR 检测器首先对参考单元采样由小到大作排序处理, 然后取第 k 个采样值作为干扰功率电平估计值。其结构如图 2 所示。

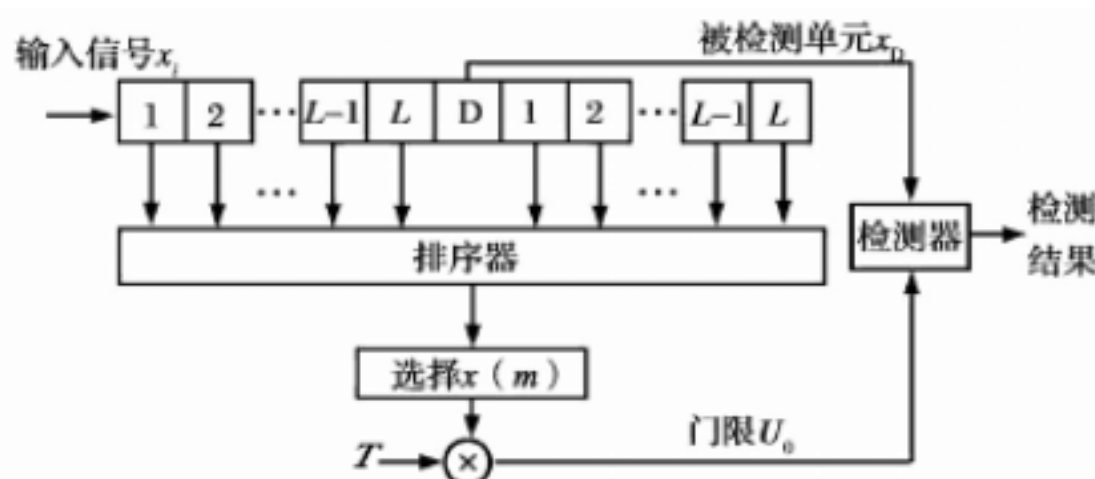


图 2 OS - CFAR 检测器原理图

对于高斯白噪声干扰下的平方律检波器, 单个目标检测的虚警概率为 $P_{FA} = e^{-T}$, T 为检测门限, 如果要获得特定的虚警概率, 需要设定门限值为 $T = -\beta^2 \ln P_{FA}$, 则虚警概率为 $P_{FA} = e^{-T\beta^2}$, 其中, β^2 表示干扰的全部噪声功率, $T = \alpha\beta^2$ 为检测门限, α 是虚警概率期望值的函数。因此, 可计算得到平均虚警概率为

$$\overline{P_{FA}} = \int_0^\infty P_{FA}(T) p_T(T) dT \quad (2)$$

式中: $p_T(T)$ 为门限的概率密度函数。经过冗长的

推导后得到

$$\overline{P_{FA}} = \int_0^\infty \left\{ \frac{N!}{k!(N-k)!} \right\} \alpha_{OS}^{N-k+1} T'^{k-1} [1 - e^{-T'}]^{k-1} dT' \quad (3)$$

式中: $T' = \frac{T}{\alpha_{OS}}$, N 为参考单元总数, 第 k 个有序统计量作为数据样本的估计。当 α_{OS} 为整数时 (3) 式可以化简为

$$\overline{P_{FA}} = k \frac{N!}{k!(N-k)!} \cdot \frac{(k-1)! (\alpha_{OS} + N - k)!}{(\alpha_{OS} + N)!} = \frac{N! (\alpha_{OS} + N - k)!}{(N-k)! (\alpha_{OS} + N)!} \quad (4)$$

2

(2D - CFAR)

上述的两种典型 CFAR 检测器, 它们使用的参考窗均为一维参考窗。研究发现, 雷达背景中的噪声和杂波是在距离和多普勒域二维同时存在, 并且局部噪声在剔除异常值后, 可以认为是平稳的高斯随机过程。显然, 利用待检单元附近二维空间上的单元作为参考单元获得背景的包络估计要更有效。文献 [5 - 6] 提出了二维的恒虚警参考窗结构 (2D - CFAR), 如图 3 所示, 其滑窗结构具有二维特征。在二维参考单元区域进行噪声均值估计后, 待检测单元与之相比较, 如果待检单元的检验统计量超过由虚警概率确定的门限, 则判定待检单元有目标。

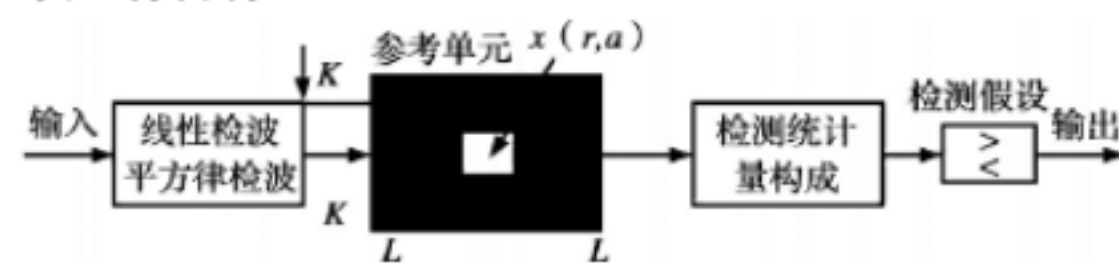


图 3 传统 2D - CFAR 参考窗结构

2.1 海杂波幅度特性分析

海环境下经由海面反射的雷达海杂波强度不仅与雷达系统的波长、空间分辨单元 (角度单元、距离刻度) 和照射方向 (入射角、天线架高、极化) 等参数有关, 也会受到海面参数、气象因素的影响。这些因素导致海杂波多普勒频率存在很大的随机性, 且多普勒频谱极为复杂。每一个雷达分辨单元中包含了大量的、相互独立的散射源, 但其中没有贡献明显的个体, 该分辨单元内的杂波幅度、相位均是这些散射源的叠加, 而相邻的 2 个分辨单元之间的数据没有关联性。因此, 不能简单地认为海杂波的幅度分布是对数 - 正态 (Log - Normal) 分

布、维泊尔 (Weibull) 分布或 K 分布, 而可能是一个复合体^[7]。

对于低分辨率和低数据率的雷达, 在相对均匀的海环境 (如低海情的远海海面) 下, 雷达接收的海杂波是非相干的。当雷达以低仰角发射信号时, 海平面悬浮的水蒸气捕捉到电磁信号形成“距离相关”的波导, 这就导致多重反射和强烈的交叉作用, 从而形成“拱形”的等距离环形海杂波^[8]。图 4 所示为海面雷达回波的强度图。从图中可以看出, 在某些等距离维上雷达回波强度大, 幅度分布呈现一圈一圈“拱形”的等距离环形特点, 图 5 所示为 PPI 显示图。

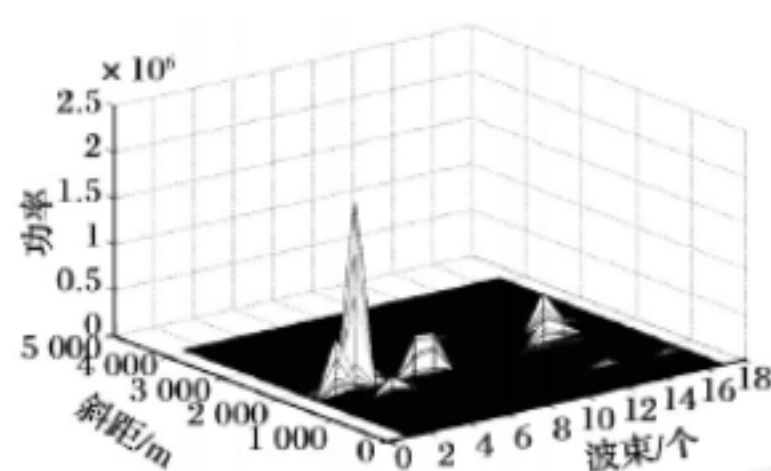


图 4 海杂波功率图

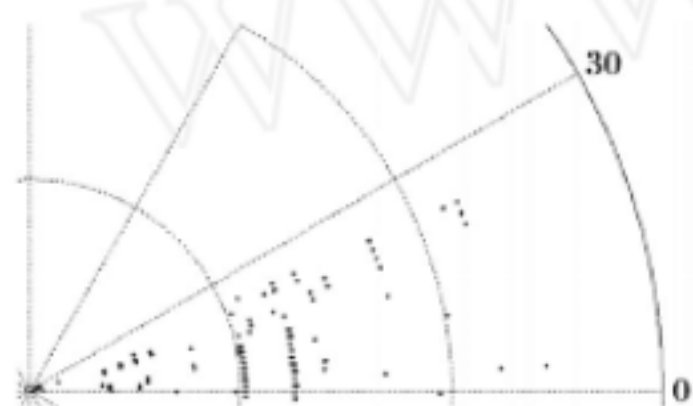


图 5 一帧数据的 PPI 显示图

2.2 改进型 2D - CFAR 参考窗结构

海杂波具有等距离环幅值特性的特点, 即在雷达的各个方位向相等距离扫描区域存在大量的强杂波点, 从而形成以雷达为中心的环状杂波点。传统的 CA - CFAR 和 OS - CFAR 都是在一维距离向进行杂波抑制, 而对等距离环无作用; 而传统的 2D - CFAR 参考窗为矩形窗。在低数据率、低距离分辨率的雷达系统中, 这样的参考窗将引入大量与判决单元不相关的单元, 导致检测性能严重下降。

针对这些特点, 改进传统的 2D - CFAR 参考窗结构, 提出了一种新的改进型 2D - CFAR 参考窗结构。该方法改进的地方分别为: (1) 不在距离和多普勒单元处理, 而是直接在距离和方位单元; (2) 改进型的参考窗不直接在二维平面取, 而只利用和检测单元处于同一距离单元和处于同一方位单元的这些单元作为参考单元, 即参考窗为十字形结构。(3) 在处理实际杂波数据时, 改进的 2D - CFAR 是对两个方向分别做 OS - CFAR 处理,

然后将得到的结果相乘, 形成最后的检测报告。该参考窗如图 6 所示。

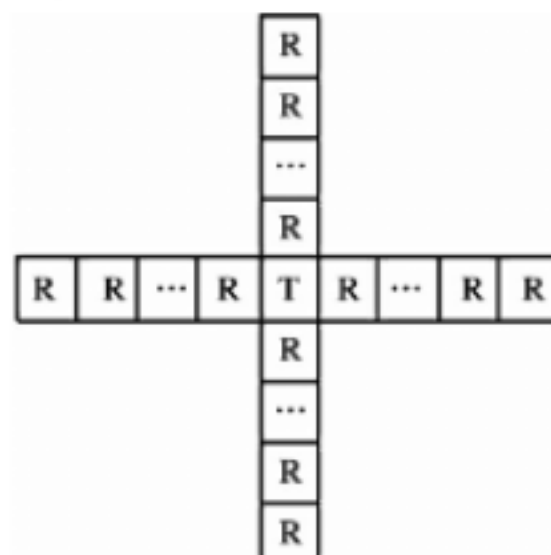


图 6 改进的 2D - CFAR 参考窗结构图

图中, T 为检测单元, R 为参考单元。如果为了防止其他目标的干扰, 也可以在待检单元周围加保护单位。

改进型 2D - CFAR 充分考虑了海杂波的等距离环的特点。这样既能保持传统的一维 CFAR 处理的优势, 又能针对等距离环幅度特性的强杂波点作恒虚警处理, 而且避免了其他无意义的单元影响检测性能。因此, 改进型 2D - CFAR 参考窗能很好地抑制海杂波。

3 试验结果

下面利用某单位提供的海杂波实测数据验证本文所提方法的有效性。获得该数据的雷达系统是低距离分辨率、低数据率的雷达。目标由远至近地飞入雷达扫描范围。图 7 为多帧数据叠加的效果图。图中近场的点为杂波, 远处有一个目标飞入雷达威力范围时雷达记录的航迹点。

图 8 给出了采用改进型 2D - CFAR 参考窗处

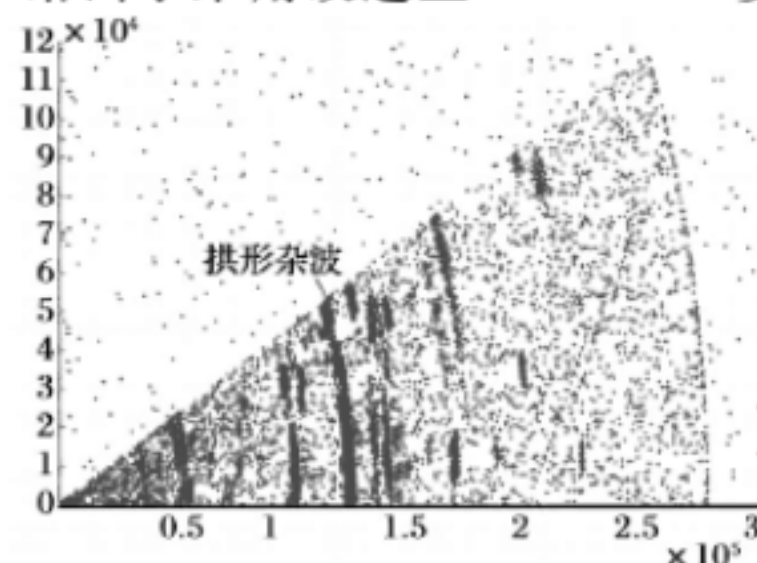


图 7 实测数据场景图

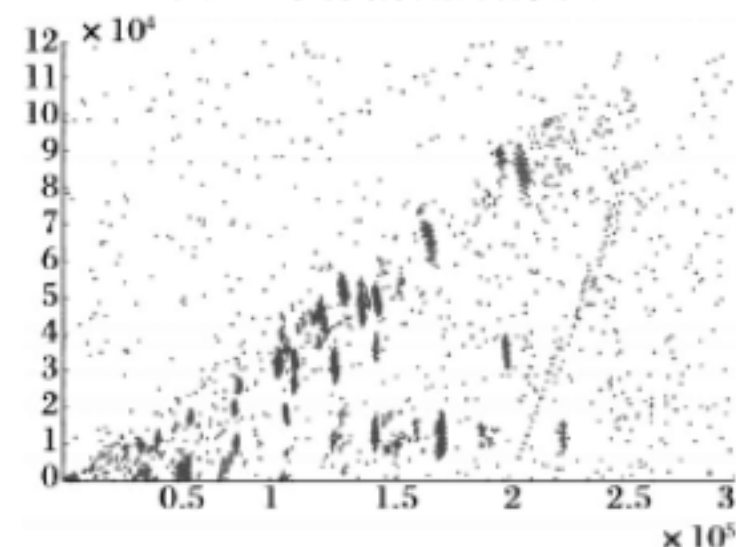


图 8 多帧数据采用改进型 2D - CFAR 处理结果图

理后的结果。从图 8 可以看出，大量的剩余杂波被抑制，目标航迹凸显出来。

针对以上场景，在分别恒定检测概率和虚警概率的情况下，统计了全区域和目标区域的点数。表 1 给出了试验结果，其中 2D - CFAR 参考窗结构中均采用 OS - CFAR 检测器。

1 CFAR					
检测方法		一维参考窗		二维参考窗	
		CA -	OS -	传统的	改进的
		CFAR	CFAR	2D - CFAR	2D - CFAR
实验一	全区域	8 863	10 054	37 971	6 210
	目标区域	1 034	808	3 244	674
实验二	全区域	4 383	7 307	13 961	3 377
	目标区域	344	389	2 493	350

试验一为保证检测概率的情况下对比虚警点数。从表 1 可以看出，改进型 2D - CFAR 参考窗在目标区域处点数最少，且全区域的虚警点也是最少的，因此是所有结构中杂波抑制效果最好的。试验二为保证虚警概率一定的情况下的试验结果。从试验二的结果可看出，虽然一维参考窗处理后的总点数较少，但是目标区域的点数也同样减少，意味着存在漏检；传统的 2D - CFAR 虚警点多，杂波抑制效果差，改进型 2D - CFAR 在目标区域处点数与一维参考窗处理结果相同，但全区域点数大大减少，表明了检测结果的有效性。

从上面试验结果可以看出，对于存在等距离环的海杂波情况，传统的 2D - CFAR 参考窗杂波抑制的效果最差；一维参考窗的抑制效果优于传统的 2D - CFAR 参考窗；而本文所提的改进型 2D

- CFAR 参考窗的抑制效果最好。

4 结 论

针对具有等距离环特性的海杂波，本文提出了一种改进型 2D - CFAR 参考窗结构，利用实测数据验证了该结构对杂波抑制的有效性，并得出了一些有益的结论，对雷达在海环境下检测目标和杂波抑制有一定的借鉴作用。

[1] Skolnik M I 雷达手册 [M]. 王军, 林强, 米慈中, 等, 译. 第 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2003

[2] Ritcey J A. Performance of the Order Statistic CFAR Detector in Two Multiple Target Environments[J]. Nineteenth Asilomar Conference on Circuits, Systems and Computers, 1985: 573 - 580

[3] 何友, 关键, 彭应宁, 等. 雷达自动检测与恒虚警处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999

[4] Rohling H. Radar CFAR Thresholding in Clutter and Multiple Target Situations [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1983, 19(4): 608 - 621.

[5] Richards M A. 雷达信号处理基础 [M]. 邢孟道, 王彤, 李真芳, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2008

[6] 杨强, 刘永坦. 复杂背景下的二维检测研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2001, 24(1): 34 - 37.

[7] Long M W. Radar Reflectivity of Land and Sea[M]. 3rd ed. Artech House, 2001.

[8] Yarden C, Gerstoft P, Hodgkiss W S. Tracking Refractivity from Clutter Using Kalman and Particle Filters [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(4): 1058 - 1070.

· 简讯 ·

基辅雷达工厂在 AviaSvit 展示了其改进的 9B - 1101K 半主动导引头。

该导引头是安装到 R - 27R1 (AA - 10 “白杨”) 空空导弹上的一种导引头。展出的这种改进型号配有全新的组件，取代了早先苏联时代的电子部件。

“9B - 1101K 导引头性能有明显

提高，” 雷达工厂的代表透露，“但这种改进设计不是某特殊研制项目要求的，而是由于最初设计的组件不再生产而被更先进的模块取代造成的。这个升级过程形成了目前的设计。”

雷达工厂是前苏联所有工厂中唯一制造这种导引头的工厂，前苏联留下了乌克兰生产厂中这种导弹的目前所有操作人员。

“俄罗斯一直努力想建起该导弹的生产线，但是每一次都由于不同原因而中断，” 雷达工厂的一个设计者

说。“尽管目前俄罗斯与我们政府的关系可能有所改善，但是俄罗斯并没有安排从乌克兰额外订购。他们总是更希望花一年时间提升在俄罗斯生产某系统的能力，而不是从我们这里订购——即使我们已经在制造这些系统，并能交付目前他们需要的产品。”

雷达工厂现在正在研发一些新一代导引头，在这个过程中将建立起一套全新的生产线，与在俄罗斯研制的类似产品竞争。

(赵鸿燕 王秀萍)