

SZ 相位编码与批处理退距离折叠的比较分析

王 旭¹ 谢承华²

¹(成都信息工程学院大气探测重点实验室 四川 成都 610225)

²(成都远望科技有限责任公司硬件开发部 四川 成都 610225)

摘 要 距离折叠是脉冲多普勒天气雷达的固有问题,波长较短的 X 波段雷达折叠尤为严重。首先给出两种退距离折叠算法批处理和 SZ 相位编码的原理,然后对它们的杂波抑制能力、适用仰角、扫描时间、算法的复杂性等进行比较,并根据实际采集的 X 波段雷达回波信号,比较它们退距离折叠的效果。得出以下结论:SZ 相位编码退距离折叠的效果明显优于批处理,虽然其运算较批处理复杂,但满足实时处理的要求,且不受扫描仰角的限制。

关键词 多普勒天气雷达 最大不模糊距离 距离折叠 退距离折叠 批处理 SZ 相位编码

中图分类号 TP391 文献标识码 A

COMPARITIVE ANALYSIS BETWEEN SZ PHASE CODING AND BATCH MODE MITIGATIVE RANGE AMBIGUITY

Wang Xu¹ Xie Chenghua²

¹(Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, Sichuan, China)

²(Hardware Development, Chengdu Yuanwang Science and Technology Co., Ltd, Chengdu 610225, Sichuan, China)

Abstract Range ambiguity is an inherent problem of the pulse Doppler weather radar. For X band radars whose wavelength is shorter, the ambiguity is particularly serious. At the beginning, the principles of two mitigative range ambiguity algorithms, batch and SZ phase coding, are presented. Then comparison is done with their clutter suppression capability, applicable elevation, scan time, and algorithm complexity etc. Moreover, according to their actually sampled X band radar echo signal, the effect of their mitigative range ambiguities are compared. Then conclusion is drawn that the effects of SZ phase coding is obviously superior to batch since despite of its more sophisticated calculation, it not only satisfies the real-time processing requirement but also is free to all elevations.

Keywords Doppler weather radar Maximum unambiguous range Range ambiguity Mitigative range ambiguity Batch mode SZ phase coding

0 引 言

发射脉冲为均匀时间间隔的脉冲多普勒天气雷达,其能够探测的最大不模糊距离(R_{\max})和最大不模糊速度(V_{\max})与脉冲重复周期(PRT)之间的关系分别为:

$$R_{\max} = \frac{c \cdot \text{PRT}}{2} \quad (1)$$

$$V_{\max} = \frac{\lambda}{4 \cdot \text{PRT}} \quad (2)$$

因此 R_{\max} 和 V_{\max} 的乘积就受到限制,即:

$$R_{\max} \cdot V_{\max} = \frac{\lambda \cdot c}{8} \quad (3)$$

式中, λ 表示雷达波长, c 表示光速。如式(3)所示,当雷达波长选定后, R_{\max} 和 V_{\max} 是相互制约的:当我们增大其中一个,必然会导致另外一个减小;且波长越短,约束条件越苛刻。

当目标沿雷达径向的运动速度大于 V_{\max} 时,雷达会将一个小于 V_{\max} 的速度赋予该目标,即出现“速度模糊”。当目标离雷达的距离大于 R_{\max} 且位于 $kR_{\max} + R_s$ (k 表示任意一个正整数, R_s 表示小于 R_{\max} 的正数)时,在雷达回波图上该目标将出现在距

离 R_s 上,这就是“距离折叠”。距离在 R_{\max} 内的回波称为“一次回波”,距离在 R_{\max} 和 $2R_{\max}$ 内($k=1$)的回波称为“二次回波”,依次类推,甚至可能存在三次($k=2$)甚至更高次($k>2$)回波。出现距离折叠时,二次或更高次回波将折叠进一次回波中,导致我们对回波出现位置的错误判断并影响产品的数据质量。将折叠进一次回波中的高次回波还原到其所在的真实位置并得到折叠回波相应的谱参数估计过程称为“退距离折叠”。当使用多普勒天气雷达观测大中尺度的强对流天气(所需 R_{\max} 和 V_{\max} 都较大)时,为了减少速度模糊,选用较小的 PRT,则 R_{\max} 较小,会出现距离折叠。

迄今为止,已提出了多种方法解决距离折叠,但没有任何一种方法能完全去除距离折叠,最好的方法也只能是减轻它的影响。通常有两类处理方法:在时域处理或在频域处理。

现有的多普勒天气雷达大多采用时域的批处理或者分离扫描的方法退距离折叠^[1]。Sachidananda 和 Zrnice 提出了频域的 SZ 相位编码退距离折叠^[2]。Frush 等使用试验数据证明了该算

收稿日期:2010-10-27。国家自然科学基金面上项目(41075010);成都信息工程学院校选课(CRF201012)。王旭,硕士,主研领域:天气雷达信号与信息处理。

法; Hubbert 等使用试验数据对该算法进行了统计评估^[2]; SZ 相位编码算法自 2007 年春季以来已在美国天气警戒雷达上实现^[3]。国内对 SZ 相位编码算法退距离模糊的研究起步较晚, 目前只有四创公司将 SZ 相位编码技术应用到某 C 波段(5cm)多普勒天气雷达上进行了业务试验^[4]。由于 X 波段(3cm)雷达波长较短, 根据式(1)~式(3)可判断其出现距离折叠的可能性远大于 S 波段(10cm)和 C 波段雷达, 所以本文首次将 SZ 相位编码应用到 X 波段双极化多普勒天气雷达上分析比较其与批处理退距离模糊的性能。

本文首先介绍批处理和 SZ 相位编码的原理, 然后在此基础上分析比较了两种算法的杂波抑制能力、适用仰角、扫描时间、所需的运算时间、算法的复杂性以及退距离模糊的性能。结果表明: 批处理不能进行杂波抑制, 无法恢复出叠加的弱回波的速度, 并且当叠加回波的功率比小于门限值 $TOVER$ 时, 叠加的强和弱回波的速度都不能恢复; 虽然 SZ 相位编码所需的扫描时间较长, 运算较为复杂, 但是它能进行杂波抑制, 退距离模糊效果也明显优于批处理算法, 能够恢复出叠加的强和弱回波的速度, 且能满足实时处理的需求。

1 批处理退距离折叠的原理

批处理的脉冲发射方式如图 1 所示: 先发射一组长 $PRT(PRT1)$ 的脉冲, 获得对回波强度(反射率)和位置的估计, 因为此时对应的 R_{max} 较大而 V_{max} 较小, 所以得到的回波不存在距离折叠, 但不用它估计速度; 再发射一组短 $PRT(PRT2)$ 的脉冲, 用它估计速度, 此时 V_{max} 较大但 R_{max} 较小, 可能出现距离折叠, 所以必须对其速度进行判断, 利用 $PRT1$ 的强度和位置信息定位 $PRT2$ 的速度估计是一次回波还是二次回波或更高次回波, 决定把来自 $PRT2$ 的速度估计放到合适的距离位置。批处理退距离模糊算法有两种情况^[1]: 无回波叠加和有回波叠加, 回波叠加表示有回波折叠进相同的距离库中。

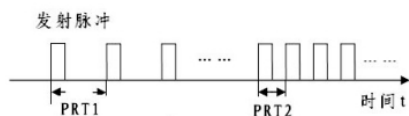


图 1 批处理的脉冲发射方式

1.1 无回波叠加

此时没有回波折叠进相同的距离库, 退距离折叠的步骤如下: 首先计算出 $PRT2$ 中 R_s 位置处的回波速度所有可能存在的位置 $kR_{max2} + R_s$ ($k = 0, 1, 2, \dots, R_{max2}$ 表示与 $PRT2$ 对应的最大不模糊距离); 由于没有回波折叠, $PRT2$ 中的一个速度估值对应着 $PRT1$ 中的一个功率估计, 即 $kR_{max} + R_s$ 中的 k 值唯一。根据 $PRT1$ 获得的回波功率位置, 确定 k 的取值, 将速度值赋给 $kR_{max} + R_s$ 处的回波即可。

1.2 有回波叠加

此时有回波折叠进同一距离库中。退距离折叠的步骤如下: 首先计算出 $PRT2$ 中 R_s 位置处的回波速度信息所有可能存在的位置 $kR_{max2} + R_s$; 然后与 $PRT1$ 获得的回波功率位置相比较, 由于有多个回波功率折叠进同一距离库, 所以 $PRT2$ 中的一个速度估值对应着 $PRT1$ 中的多个功率估计, 即 $kR_{max} + R_s$ 中的 k 值不唯一。由于速度估算以功率为权重, 将折叠进同一距离库的多个功率值进行比较, 只有当某个目标的回波功率明显大于

其它目标的回波功率时, 才将该速度数据赋给产生这个较大回波功率的目标。如图 2 所示: 叠加的两个目标 A 和 B, B 的回波功率明显大于 A, 则估算出的回波速度更接近于 B, 将该速度赋给 B。

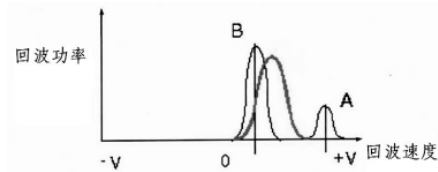


图 2 两个目标折叠进同一距离库时, 速度估计赋值示意

比较折叠进同一距离库的回波功率时, 以两个回波以 dB 为单位的功率比进行计算:

$$Ratio = 10 \log \left[\frac{P_{high}}{P_{low}} \right] \quad (4)$$

其中, $TOVER$ 表示功率比门限; P_{high} 表示折叠进同一距离库中的较强回波对应的功率; P_{low} 表示折叠进同一距离库中的较弱回波对应的功率。

若某个距离库满足: $Ratio > TOVER$, 速度将赋予回波强度较强的目标, 其他回波位置在速度图中将指定为紫色, 表示此时无法确定较弱回波的真实速度; 若 $Ratio < TOVER$, 则所有叠加的回波在速度图中都指定为紫色, 表示此时退距离模糊算法失效, 无法确定目标的速度。因此, $TOVER$ 的取值将影响批处理退距离折叠的效果。高 $TOVER$ 值能改进速度和谱宽数据赋值的精度, 但是将在速度图上产生面积较大的紫色区域; 低 $TOVER$ 值将使速度图上紫色的区域明显较少, 但速度和谱宽的估计精度降低, 本文取 $TOVER$ 等于 5dB。

2 SZ 相位编码退距离折叠的原理

用相位变化的方法可以扩展不模糊距离, 同时还可以消除由于回波叠加而引起的谱矩估计的偏差。相位变化法分为两种: 随机相位法和相位编码法。由于随机相位法对期望回波进行恢复时非期望回波呈白噪声, 使等效信噪比降低, 影响谱矩估计的准确性, 所以限制了该方法的使用。相位编码法是发射脉冲的相位按一定的码值周期性变化, 接收端按码值规律进行解调, 通过将不期望的回波频谱分散的方法来降低叠加回波对所需信号的谱矩估计的影响, 它使弱回波在频域内进行频谱复制, 总有一个或多个复制谱离强回波谱比较远, 在滤除强回波后, 利用两个剩余的弱回波复制谱就可以恢复出弱回波, 得到弱回波参数估计^[5,6]。基本原理如下:

多普勒天气雷达脉冲对处理 (PPP) 算法利用延迟为 PRT 的自相关 $R(PRT)$ 的相位估计速度, 当回波产生距离折叠时, 回波信号的采样 $V(i)$ 是一次回波采样 $V1(i)$ 和二次回波采样 $V2(i)$ 之和, 由于在大多数情况下, 一次回波和二次回波不相关或相关性很小, 故 $R(PRT)$ 可以表示为一次回波和二次回波的延迟为 PRT 的自相关函数之和^[4]:

$$R(PRT) = R_1(PRT) + R_2(PRT) \quad (5)$$

则一次回波的平均速度为:

$$\begin{aligned} V_{r1} &= \frac{\lambda}{4\pi PRT} \arg[R(PRT)] \\ &= \frac{\lambda}{4\pi PRT} \arg[R_1(PRT) + R_2(PRT)] \end{aligned} \quad (6)$$

此时, 会由于 $R2(PRT)$ 而引入偏差, 若 $R2(PRT)$ 为零则可消除

二次回波对 V_{r1} 估计的影响。

相位变化的目的在于改变二次回波的相位,使 $R2(PRT) = 0$, 这样二次回波就不再影响一次回波速度的估计; 反之, 改变一次回波的相位, 使 $R1(PRT) = 0$, 使一次回波不再影响二次回波速度的估计。

相位编码的具体做法是: 使用序列 $a_k = \exp(j\psi_k)$ 对发射脉冲进行调制, 即发射脉冲序列的相位增加 ψ_k , 接收到的回波采样信号乘以 a_k^* 以恢复相位, 即接收采样序列的相位减去 ψ_k 。这样, 一次回波就被同步, 二次回波被 $c_k = a_{k-1} a_k^*$ 调制, 即 $R2(PRT) = 0$; 我们也可以将回波采样信号乘以 a_{k-1}^* 使二次回波同步, 而一次回波被 $c_k^* = a_{k-1}^* a_k$ 调制, 即 $R1(PRT) = 0$ 。国内外学者对多种相位编码序列进行了仿真研究, 目前广泛采用 SZ (8/64) (简称 SZ) 相位编码, 该码的频谱有 8 个均匀分布的非零谱分量, 谱分量之间距离为 8。

SZ 相位编码在同一个仰角做两次全方位的 360 度扫描: 先使用不编码的长 PRT 扫描, 得到不折叠的回波功率, 然后使用编码的短 PRT 扫描, 得到对叠加回波的速度估计 (V_{r1} , V_{r2}), 获取叠加回波速度估计 V_{r1} 和 V_{r2} 的方法简单描述如下^[7]: 在频域处理中, 先用 PPP 估算较强回波的谱矩, 求出其谱中心, 然后用一个特定宽度的凹口滤波器以这个谱中心进行滤波处理, 将强回波的频谱滤除并保留两个调制后的弱回波信号的两个复制谱, 当一次回波和二次回波叠加时 (大多数情况如此), 调制后的弱回波有 8 个复制谱, 选择使用凹口宽度为 3/4 的凹口滤波器^[8]。最后再进行弱回波的频谱重构, 恢复出弱回波。该算法的详细说明可参考文献 [9]。

由于距离折叠发生在较低的仰角, 不可避免地存在地物杂波, 为了减轻杂波的影响, 需要做地物杂波抑制。使用无限冲击响应滤波器可以抑制地物杂波但会降低对叠加的弱回波速度估计的准确性。所以选择使用频域滤波器, 既不需预先设定杂波图且可以对所有回波程中的地物杂波和异常传播杂波进行抑制^[10]。

3 批处理和 SZ 相位编码的比较分析

3.1 杂波抑制能力

由于批处理采用了交替 PRT 进行扫描, 而非均匀间隔的 PRT 扫描, 所以如何对其进行杂波抑制是一个难点, 现在的批处理都没有进行杂波抑制, 所以批处理结果中存在杂波的影响没有消除。而 SZ 相位编码, 使用均匀间隔的单一 PRT, 采用频域滤波做杂波抑制, 既能有效地抑制正常传播时的地物杂波, 又能抑制异常传播产生的地物杂波。

3.2 适用的扫描仰角

由于批处理不能进行杂波抑制, 所以不适用于被地物杂波所污染的仰角, 一般仅用于中等仰角; 而 SZ 相位编码由于采用了先进的频域杂波抑制处理, 适用于所有需要退距离模糊处理的仰角。

3.3 扫描时间

若批处理和 SZ 相位编码采用相同的两种 PRF 和采样个数进行扫描, 批处理只需做一次全方位的 360 度扫描; 而 SZ 相位编码在同一仰角要做两次全方位的 360 度扫描, 处理过程中, 需要进行扫描过程的切换, 所以所需时间多于批处理。

3.4 处理时间和算法的复杂性

批处理在时域进行退距离模糊处理, 算法简单, 所需的处理时间也较少; 而 SZ 相位编码在频域进行处理, 需要进行傅立叶变换以及傅立叶反变换, 所需要的运算时间要远大于批处理。

3.5 退距离模糊效果

通过一个实例比较批处理和 SZ 相位编码退距离折叠的效果。实验数据从位于成都信息工程学院的 X 波段双极化多普勒天气雷达获取。数据采集时间为 2008 年 9 月 24 日, 仰角为 0.5 度, 采集数据使用的参数如表 1 所示 (其中, 批处理与 SZ 相位编码所采用的两组 PRF 的参数相同)。其中 PRF 表示脉冲重复频率, $PRF = 1/PRT$ 。

表 1 试验所采用的扫描参数

扫描模式	PRF (Hz)	Rmax (km)	Vmax (m/s)	采样点数 (个)
警戒模式 (CS)	375	400	3	32
连续多普勒模式 (LCD)	1500	100	12	64
SZ 相位编码	375 (未编码)	400	3	32
模式	1500 (编码)	100	12	64
批处理模式 (B)	375	400	3	32
	1500	100	12	64

图 3 到图 6 是根据表 1 得到的反射率和速度图像, 图中每个距离圈代表 50km。其中, 图 3 表示 CS 模式 (长 PRT) 下得到的反射率平面位置显示 (PPI) 图, 由于未做滤波处理, 该回波图中雷达西北和东南方向有两片带状的地物杂波区域 (椭圆区域所示)。图 4 表示 LCD 模式 (短 PRT) 下得到的速度图, 未作杂波抑制。图 5 表示 B 模式下得到的速度图 (短 PRT); 图 6 表示 SZ 相位编码算法得到的速度图 (短 PRT)。

将图 4 与图 3 比较可知: 图 3 中 100km 外 (圆圈之外) 的二次回波折叠进 100km 内, 出现了距离折叠。100km 外的回波速度无法估计, 且由于有多个回波折叠进同一距离库, 用一次回波和二次回波的叠加采样估算出的一次回波的速度也不准确。

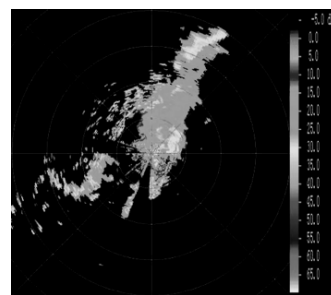


图 3 CS 时的反射率 PPI, 无回波折叠 (未做杂波滤波)

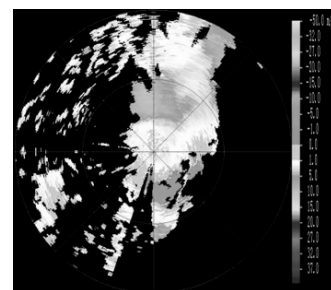


图 4 LCD 时的速度 PPI 图 3 中 100km 外的回波折叠进 100km 内 (无杂波滤波)

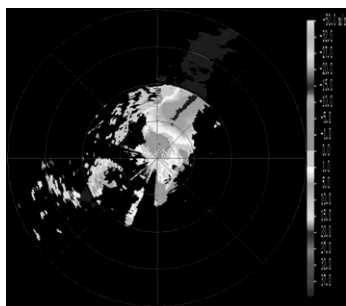


图 5 B 模式时的速度 PPI, 无回波折叠但有紫色区域(无杂波滤波)

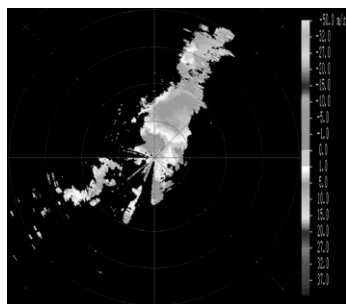


图 6 SZ 模式时的速度 PPI, 无回波折叠及紫色区域(已做杂波滤波)

将图 5 与图 4 比较可知: 100km 外的二次回波折叠进 100km 内之后, 与 100km 内的一次回波产生叠加(即批处理中的第二种情况), 而大部分叠加的一次回波功率与二次回波功率的比值大于 $TOVER$, 所以, 一次回波的速度得到了恢复, 而二次回波的速度只能在相应位置用紫色表示, 说明此处距离退模糊算法失效。

从图 5 中还可以看出, 一次回波中也有部分紫色区域, 说明此时叠加的一次回波功率与二次回波功率相当(比值小于 $TOVER$), 叠加的一次回波和二次回波的速度都无法恢复。且由于批处理没有做地物杂波抑制, 椭圆区域中的回波将影响我们对天气回波目标的判断。

将图 6 与图 3 比较可知: SZ 相位编码中做了地物杂波抑制处理, 消除了地物杂波的影响。将图 6 与图 5 比较可知: 批处理退距离折叠后的速度图中出现的大片紫色区域已不存在, 得到比较连续的速度数据。这说明使用 SZ 相位编码算法不仅能够恢复出叠加的一次回波的速度, 而且能够恢复出叠加的二次回波的速度。SZ 相位编码退距离模糊的效果明显优于传统的批处理。

4 结 语

本文重点对批处理和 SZ 相位编码退距离模糊算法原理进行了描述, 并从杂波抑制能力、运算复杂性和退距离模糊性能等多方面对两种算法做了比较。通过将两种算法分别应用于 X 波段双极化多普勒天气雷达进行验证可得到以下结论: 虽然 SZ 相位编码所需的扫描时间稍长, 且算法复杂运算量大, 但其退距离折叠的效果明显优于批处理, 且能够实现地物杂波抑制, 大大改善了 X 波段多普勒天气雷达的探测性能。并且通过试验表明: 借助于微软 IPP 性能库中的函数实现快速傅立叶变换和傅立叶逆变换, 并通过合理的软件编程, 能够达到对雷达回波数据

实时处理的需求。但是 SZ 相位编码算法对移相的精度要求较高, 因此该算法对雷达信号处理器的硬件设计也有较高的要求。希望通过进一步的研究, 在不久的将来能够用 SZ 相位编码算法替代传统天气雷达中的批处理模式进行退距离模糊处理, 提高对大中尺度天气系统的探测能力, 进而提高预报水平。

参 考 文 献

- [1] 何建新, 姚振东, 李飞, 等. 现代天气雷达[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2004.
 - [2] Frush C L, Doviak R J, Sachidananda M, et al. Application of the SZ phase code to mitigate range-velocity ambiguities in weather radars[J]. Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19: 413-430.
 - [3] 唐瑾. 脉冲多普勒雷达退模糊算法研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2006.
 - [4] 潘新民, 柴秀梅, 申安喜, 等. 新一代天气雷达(CINRAD/SB)技术特点和维修、维修方法[M]. 北京: 气象出版社, 2009.
 - [5] Hubbert J C, Meymaris G, Keeler R J. Range velocity mitigation via SZ phase coding with experimental S-band radar data[C]//Preprints 31st International Conference on Radar Meteorology, Seattle, August 6 - 12 2003. American Meteorological Society, 2003.
 - [6] Frush C L, Doviak R J. Range ambiguity mitigation for NEXRAD using SZ phase coding[C]//Preprints 30th International Conference on Radar Meteorology, Munich, July 19 - 25 2001. American Meteorological Society, 2001.
 - [7] 周红平, 唐瑾, 陈大鹏. 一种相位编码算法在气象雷达中的应用[J]. 小型微型计算机系统, 2006, 27(12): 2310-2313.
 - [8] Sebastián M T. Range and velocity ambiguity mitigation on the US NEXRAD network: performance and improvements of the SZ-2 phase coding algorithm[C]//Fifth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, Helsinki, June 30-July 4 2008. ERA40, 2008.
 - [9] National Severe Storms Laboratory. Signal design and processing techniques for WSR-88D ambiguity resolution, Part 11: Staggered PRT and updates to the SZ-2 Algorithm[R]. Oklahoma: NSSL, 2007.
 - [10] Meymaris G, Ellis S, Hubbert J C, et al. Data quality control for the SZ (8/64) phase code for the mitigation of range and velocity ambiguities in the WSR-88D[C]//20th International Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography and Hydrology, Seattle, January 12 - 15 2004. American Meteorological Society, 2004.
-
- (上接第 48 页)
- [7] Tseng B, Soong F, A Rosenberg. Continuous probabilistic acoustic map for speaker recognition[C]//Proc. ICASSP Vol. II, 1992: 161-164.
 - [8] Kenichi YOSHIDA, et al. Speaker Recognition Using Multi-SNR Sub-band GMM under Noisy Environments[R]. Technical Report of IEICE DSP2000 - 97: 55-61.
 - [9] Minghui Liu, Zhongwei Huang. Evaluation of GMM-based Features for SVM Speaker Verification[C]//Proceeding of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008: 5027-5030.
 - [10] Hirokazu Itahashi, et al. Explaining A Discriminate Model Constructed By SVM in Text Categorization[C]//The 22nd Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2008: 1-4.
 - [11] 伊·达瓦, 白井克彦. 自由文话者识别方法: 2004 - 53821 (P2004 - 53821A) [P].