

低信噪比下多高斯脉冲组成的激光雷达回波信号滤波算法

樊宪唐¹, 张斌², 马鹏阁³, 羊毅¹

(1. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471009;

2. 河南机电职业学院, 郑州 450021; 3. 郑州航空工业管理学院, 郑州 450015)

摘要: 针对激光目标回波信号在高信噪比与低信噪比时脉冲波形不同的特点, 研究设计了针对低信噪比下多高斯脉冲组成的回波信号进行降噪的小波滤波算法。首先介绍了光电探测中信噪比的定义, 给出了不同信噪比下脉冲回波的实际波形。接着, 研究了高信噪比时激光回波的时域积累及差分平滑滤波算法, 仿真并分析了算法性能。随后, 对低信噪比下多高斯脉冲组成的目标脉冲波形采用小波低频系数重构滤波, 通过仿真实验选择了合适的小波基以及分解层级。

关键词: 低信噪比; 激光回波; 多高斯脉冲组成; 小波重构

中图分类号: V271.4; TN956 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)09-0011-05

A Filter Algorithm for Laser Radar Echo Signal of Multi-Gaussian Pulse at Low SNR

FAN Xian-tang¹, ZHANG Bin², MA Peng-ge³, YANG Yi¹

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471009, China;

2. Henan Mechanical and Electrical Vocational College, Zhengzhou 450021, China;

3. Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: Considering the characteristics of pulse waveform of laser echo signal in high SNR, which is different from that in low SNR, a wavelet filtering algorithm for low SNR Gauss pulse echo signal was studied. The definition of photoelectric detection SNR is introduced, and the different SNR pulse-echo waveforms are presented in the paper. Then, the echo signal accumulation in time domain and smooth filtering algorithm under high SNR conditions are studied. The simulation and analysis of the performance of the algorithm are given. Subsequently, for the multi-Gaussian pulse in the low SNR of the target pulse waveform, the low-frequency wavelet coefficient reconstruction filter is adopted, and an appropriate wavelet function and decomposition level are selected by simulation experiments.

Key words: low SNR; laser echo; multi-Gaussian pulse; wavelet reconstruction

0 引言

现代飞机在微波雷达失效或者为避免己方暴露而主动关闭的情况下, 通常采用光电探测方式对空域或地面目标进行搜索与探测。机载光电探测系统通常包括红外探测单元和脉冲激光雷达单元。前者用于被动探测空域目标的热辐射, 锁定目标方位; 后者通过激光

照射获取目标精确的距离信息, 实现对光电目标三维空间的定位。受到机载条件下激光发射功率的限制, 光电探测系统中激光探测距离远不及红外, 相差达数十千米, 这导致当目标位于激光作用距离之外却又在红外探测范围之内时, 飞行员将只能发现目标而无法获知精确距离信息。通过采用多脉冲激光照射及回波数字信号处理技术降低可检测信噪比是提高激光作用距离的重要手段。

脉冲激光雷达的准匹配滤波及多帧相关检测等数字信号处理算法能有效检测出脉冲激光目标^[1-2]。基于背景特征参数的目标检测算法运用高阶统计量作为背景特征值对杂波数据进行处理, 实现目标与背景的

收稿日期: 2013-08-12

修回日期: 2014-06-05

基金项目: 河南省科技攻关项目(132102210390); 航空科学基金(20105155003)

作者简介: 樊宪唐(1977—), 男, 山东菏泽人, 学士, 工程师, 研究方向为激光信号处理。

分离,可以较好地降低回波可检测信噪比^[3]。小波多分辨率分析方法用于激光雷达弱信号处理,也可以有效降低噪声^[4]。上述研究将目标回波简单视为单个脉冲,实际上高信噪比与低信噪比下的回波波形并不相同,低信噪比下激光回波信号的降噪算法,应针对回波信号波形特征加以设计实现。本文将针对低信噪比下具有多高斯脉冲波形组成^[5]的目标回波信号进行数字滤波算法的研究。

1 低信噪比下激光目标回波信号的波形特征

1.1 激光回波的信噪比定义

在光电信号处理中,通常采用幅度信噪比对信号进行量化,以及对算法进行评价。激光回波的信噪比表示为

$$R_{s,N} = \frac{A_s}{A_n} = \frac{V_{\max}}{V_{\text{RMS}}} \quad (1)$$

式中: A_s 为信号幅度峰值; V_{\max} ; A_n 为噪声幅度均方根值; V_{RMS} 。实际算法仿真中,将噪声视为零均值高斯白噪声,Matlab软件中通常使用AWGN函数产生含噪信号。要指出的是,AWGN函数采用的信噪比单位为dB,其值为10倍对数信号与噪声功率比,或者20倍对数幅度峰值与噪声均方根值之比,即

$$R_{s,N} = 10\lg\left(\frac{P_s}{P_n}\right) = 20\lg\left(\frac{A_s}{A_n}\right) \quad (2)$$

式中: P_s 为信号功率; P_n 为噪声功率。因此,在对算法性能评估时需要将光电信号的AWGN信噪比与幅度信噪比加以转换。

1.2 激光目标回波信号波形

图1给出了实验测试信噪比分别为9和4时的激光目标回波波形。

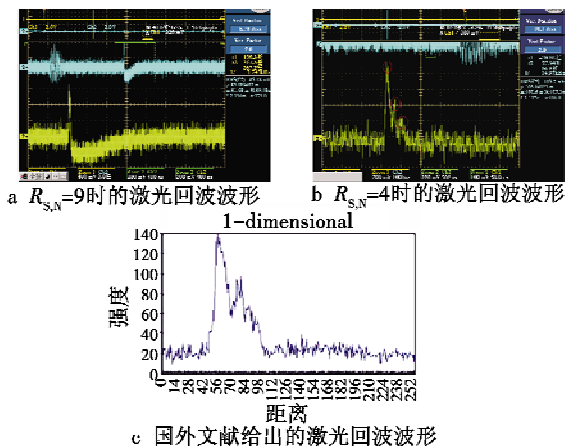


图1 不同信噪比下激光回波信号的波形

Fig.1 Laser echo waveform at different SNRs

可以看出,高信噪比的激光回波表现为单个的脉冲,波形的下降沿存在“下冲”,且功率越大下冲越强;

低信噪比激光回波则表现为明显的多“峰”组成,各个“峰”存在一定时移且幅度依次降低。激光目标回波信号波形可以建模为

$$s(t) = \sum_{n=1}^N A_n \exp\left(-\frac{(t-\mu_n)^2}{2\sigma_n}\right) \quad (3)$$

式中: A_n 和 μ_n 分别为各个高斯脉冲的幅度和时移; σ_n 为描述脉冲宽度的特征参数; N 为高斯脉冲的个数。对于实际激光器, N 可选为3,即 $n=1,2,3$ 。

2 激光回波信号的时域处理算法

2.1 算法描述

1) 多脉冲累加。

激光测距雷达的脉冲重复率较低(通常在10 Hz以下),相邻帧回波无法直接积累。随着多脉冲激光器的研制成功,在一个周期内可以连续发射多个激光脉冲串(考虑到机载激光器功率、体积重量条件限制,国内外通常采用3个,间隔数百微秒)。多脉冲激光回波信号经光电探测器转换为模拟电信号,由200 MHz高速A/D采样,首先由DSP进行累加^[6],可获得 \sqrt{N} 的信噪比增益,离散样本数据的算式为

$$y[n] = (x_1[n] + x_2[n] + x_3[n])/N \quad (4)$$

2) 脉宽匹配差分+平滑滤波。

脉冲激光雷达的发射信号为单脉冲或三脉冲波形^[7-8],其接收信号由于目标反射及传播特性被展宽,采取三脉冲积累后的回波信号也将被展宽。因此,激光雷达回波信号相对于噪声主要为低频信号,在高频信息中很难提取到有用信息^[9]。噪声功率主要集中在0~40 MHz的频率范围内,且低频能量较集中。考虑到激光回波中目标信号属于脉冲信号,首先采用隔点差分滤波滤除信号中的直流分量。其中, M 的点数选取应与目标脉冲宽度匹配。在200 MHz采样频率下,要检出50 ns左右的脉冲信号, M 通常选6点。

$$y(n) = x[n] - x[n+M] \quad (5)$$

经式(5)差分滤波之后,采用式(6)进行 N 点平滑滤波对高频噪声加以抑制,为与目标脉冲宽度相匹配,取 $N=M$,也选为6点。

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(n+i) \quad (6)$$

采用目标脉冲宽度相匹配的差分及平滑时域滤波算法,在信噪比改善的同时,运算量较小,便于实时实现。式(5)和式(6)可以合并为

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [x(n+i) - x(n+i-M)] \quad (7)$$

2.2 算法仿真

图2给出回波信号进行积累及数字滤波的仿真,采样频率为200 MHz,目标脉冲为约50 ns(考虑一定

的展宽因素)。图2a~图2c系同一目标(位于1000点处)的连续3次激光照射回波仿真波形,信噪比分别为2.2、1.8、3。图2d为图2a~图2c 3个脉冲回波信号累加后的波形,图2e为对图2d利用式(5)做差分滤波后的波形,图2f为图2e做6点平滑滤波的波形,图2f中,直线为以噪声均方根的5倍划出的门限。三脉冲累加能使回波信噪比达到4.4,而通过差分、平滑滤波,信噪比又可改善到5.5。这样,图2f中1000点处的目标脉冲及部分噪声假目标已高于设定阈值。

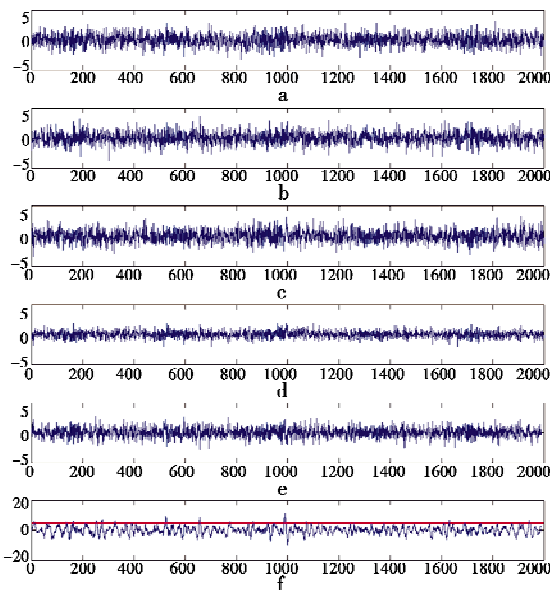


图2 激光目标回波的时域处理

Fig.2 Laser target echo processing in time domain

2.3 算法性能分析

为了对算法的滤波性能加以分析评估,设定信噪比为2~5随机发生回波进行1000次滤波仿真,回波经滤波后平均信噪比统计如表1所示。

表1 不同信噪比下时域数字滤波的信噪比改善

Table 1 Improvement of digital filtering in time domain at different SNRs

原始 SNR	2	3	4	4.5	5
滤波后 SNR	4.48	6.09	7.41	7.90	8.32

对100次实验结果加以统计,得到设定信噪比下的目标平均检测概率和目标平均捕获时间,如表2所示。

表2 不同信噪比下时域数字滤波算法检测性能

Table 2 Target detection performance of digital filtering in time domain at different SNRs

原始 SNR	2	3	3.5	4	5
检测概率/%	95	99	99	100	100
捕获时间/s	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3

上述时域数字滤波方法将差分及平滑相结合,差分滤波相当于高通滤波,平滑滤波则对应低通滤波。然而,只有在时域处理的点数与目标回波脉冲宽度相

匹配时,数字“带通”滤波的效果才较好。

3 小波低频系数重构激光回波降噪算法

3.1 算法描述

小波分析是一种具有多分辨率分析特性的时频域分析方法。1987年,MALLAT S将多分辨率分析思想引入小波分析,得到一种快速实现小波分析算法,采用正交镜像滤波器组实现对离散序列的小波分解及重构。图3和图4所示为小波分解与重构过程。

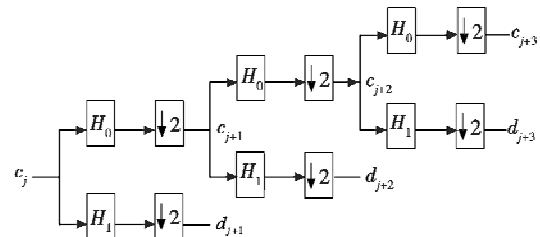


图3 离散序列的小波分解过程

Fig.3 Wavelet decomposition of discrete series

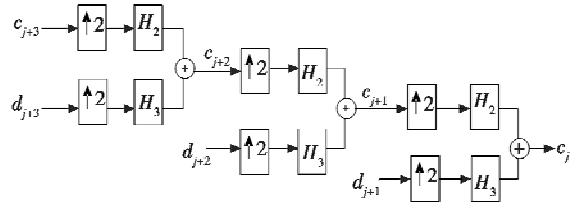


图4 离散序列的小波重构过程

Fig.4 Wavelet reconstruction of discrete series

图中, H_0 和 H_2 是低通滤波器组, H_1 和 H_3 是高通滤波器组,它们的输出分布对应离散信号的低频轮廓和低频细节。

激光回波信号主要集中于低频范围。小波分解后的高频信息基本是噪声,对回波进行小波分解后的高频信息作舍去处理,仅留下低频信息进行重构。原始信号的频带被分为低频和高频两部分,滤波后输出序列的带宽只有原始信号的一半。由带限信号的采样定理知,将采样率降低一半而不丢失任何信息,这样,通过2倍抽取可使总的输出序列长度保持一致。

基于小波分解低频信息重构的算法中,小波基的选择以及分解级数都会对信噪比的改善有较大影响。目前,已提出的小波函数可以分为3类:第1类是“原始(Crude)小波”,常见的有 Haar 小波、Morlet 小波、Mexican hat 小波、Gaussian 小波等;第2类是 Daubechis 构造的正交小波,常见的有 Db 小波、对称小波、Coiflets 小波和 Meyer 小波;第3类是由 Cohen, Daubechies 构造的双正交小波,双正交滤波器组(简称 bior(Nr,Nd)),其中,Nr 是低通重建滤波器的阶次,Nd 是低通分解滤波器的阶次。

基于小波分解低频信息重构降噪算法仿真实现的

步骤如下。

- 1) 依照激光目标模型,按一定信噪比随机发生激光目标回波信号,其中噪声为零均值高斯白噪声;
- 2) 基于选择的小波基函数进行小波分解,得到各级低、高频小波系数;
- 3) 将高频小波系数置为 0;
- 4) 基于选择的小波基函数进行小波重构,得到滤波后激光回波信号;
- 5) 计算滤波后回波信号的信噪比;
- 6) 更改小波基,重复上述实验过程;
- 7) 在上述实验基础上更改小波分解级数,统计信噪比改善实验数据,可对比得到滤波效果最好的小波基及对应分解级数。

3.2 算法性能分析

首先,选择恰当的小波基函数。经实验对比发现,Coif3 小波和 Db4 小波的降噪效果总体上好于其他典型小波。对这两种小波基,还需在不同分解级别考察算法的滤波性能。

表 3 所示为 Coif3 小波和 Db4 小波在不同分解级别,针对信噪比为 2~5 的回波信号进行 1000 次小波滤波后的信噪比统计平均数值。

表 3 不同分解级别小波基滤波的信噪比改善对比

Table 3 Improvement of wavelet filtering at different decomposition levels

$R_{S,N,0}$	Coif3-L4	Coif3-L3	Coif3-L2	Db4-L5	Db4-L4	Db4-L3	Filter
1	1.99	4.68	4.90	3.53	3.60	4.62	3.83
2	3.00	6.21	6.77	5.13	4.69	6.12	5.29
3	4.03	7.20	8.25	6.52	5.38	7.14	6.43
4	5.08	7.87	9.32	7.72	5.82	7.81	7.30

表 3 中, $R_{S,N,0}$ 对应于滤波前的信噪比, Filter 为平滑滤波器。总体上, Coif3 在三级分解层次上的滤波性能最好, Db4 小波在四级分解层次上的降噪性能也较好。

选择 Coif3-L3 和 Db4-L4 小波,在不同信噪比下进行 1000 次基于小波分解低频信息重构滤波实验,统计其信噪比改善状况。

表 4 所示为不同信噪比下利用小波降噪算法处理后的信噪比改善情况。表中给出了 1000 次随机发生信号的信噪比原始值、经折算的三脉冲累加前的信噪比,以及不同小波基滤波后的信噪比的统计均值。

表 4 不同信噪比下各小波滤波性能对比

Table 4 Improvement of wavelet filtering performance at different SNRs

	Coif3-L3	Db4-L4	Filter	$R_{S,N}/\sqrt{3}$	Coif3-L3	Db4-L4	Filter	$R_{S,N}/\sqrt{3}$
1	3.83	3.68	3.50	0.87	5	7.58	6.68	6.84
2	4.32	4.14	3.95	1.00	6	8.82	7.51	7.90
3	5.48	5.13	5.00	1.30	7	9.32	7.81	8.32
4	6.71	6.08	6.09	1.71				

可以看出,原始信噪比为 1.3 的回波,经过三脉冲累加和小波降噪后信噪比可提高到约 5.5,再利利用阈值比较和多帧校验即可检测出目标。

选择 Coif3-L3 来实现小波降噪。表 5 给出不同信噪比下算法的平均检测概率和平均捕获时间。其中, $R_{S,N}$ 为三脉冲积累前的信噪比。

表 5 不同信噪比下小波重构降噪算法检测性能

Table 5 Target detection performance of wavelet reconstruction filtering at different SNRs

参数	原始 SNR				
	1.3	1.5	2	2.6	3
检测概率/%	89	95	100	100	100
捕获时间/s	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3

可以看出,小波重构低通滤波可以将激光目标最小可检测信噪比降低到 1.3。

3.3 算法仿真与分析

仿真实验首先对比了平滑滤波和几种正交、双正交小波基低频分解系数重构进行降噪的效果。针对不同的小波基、小波分解级进行仿真实验,统计最佳小波基和分解级别。

仿真:基于目标信号模型发生的单帧随机激光回波信号 $x(n)$ 的信噪比为 1.98,目标脉冲波形位于 100~119 处,峰值点位于 106 点处。图 5 中,图 5a 为激光雷达信号,图 5b~图 5e 从上至下依次为仿真得到了 12 点平滑滤波, Coif3 对称小波、 bior6.8 双正交小波、 Db4 正交小波进行 3 级分解低频系数重构后的激光回波信号。对应滤波后的信噪比分别为 4.64、5.76、5.03 和 5.16。

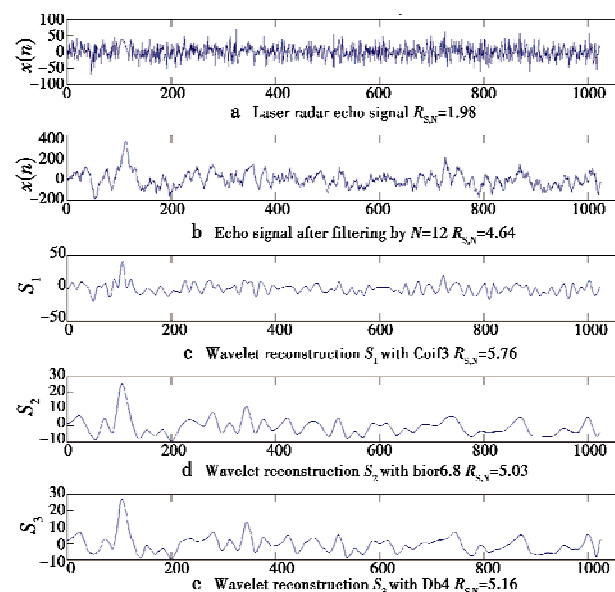


图 5 不同小波基重构滤波后的回波信号波形

Fig. 5 Echo signal waveform after wavelet reconstruction filtering

图 5b 为采用平滑滤波后的信号波形;图 5c 为采用 Coif3 小波重构滤波后的信号波形;图 5d 为采用 bior6.8 小波重构滤波后的信号波形;图 5e 为采用 Db4 小波重构滤波后的信号波形。

仿真实验表明:运用 Coif3 小波所得的低频信息对目标检测更有效,可以看出,在信噪比为 1.98 时,利用小波分解法就能很好地滤除噪声,再通过阈值比较可检测出弱小目标的位置。

综上所述,Coif3 小波的滤波性能较好,且其分解层次只需 3 级。与 Db4 小波降噪对比,Db4 在 4 级分解降噪效果较好但运算量却更大。在实时硬件实现中,通过回波数字处理器中的定时器统计降噪算法处理单帧数据的运行时间。其中,利用 C 语言编写的 Coif-L3 小波重构降噪算法中,经编译后的代码运行单帧三脉冲 300 KB 样本处理所需的时间为 82.6 ms,利用汇编语言编写的代码运行时间为 46 ms。因此,算法可以达到脉冲重复频率最高为 20 Hz 的目标实时检测要求。

4 结论

本文针对数字化脉冲激光目标的检测提出了回波信号滤波算法。在高信噪比时可采用运算量较小的时域数字滤波算法,低信噪比时采用小波重构滤波算法可以降低目标最小可检测信噪比,实现了激光雷达目标作用距离的有效提高。

参考文献

- [1] 马鹏阁,柳毅,齐林,等. 低信噪比下脉冲激光雷达回波信号小波域滤波算法[J]. 电光与控制,2011,18(4):26-29.
MA P G, LIU Y, QI L, et al. Wavelet filter algorithm for echo signal of pulsed laser radar at low SNR[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(4):26-29.
- [2] 夏桂芬,赵保军,韩月秋. 三脉冲激光雷达的目标检测[J]. 光电工程,2006,33(3):137-140,144.
XIA G F, ZHAO B J, HAN Y Q. Target detection in three pulse laser radar[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(3):137-140,144.
- [3] 平庆伟. 基于背景特征参数的激光雷达目标检测[J]. 光学学报,2008,28(s2):304-307.
PING Q W. Signal detection of laser radar based on the background character parameter[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(s2):304-307.
- [4] FANG H T, HUANG D S. Noise reduction in lidar signal based on discrete wavelet transform[J]. Optics Communications, 2004, 233(1-3):67-76.
- [5] 马鹏阁,齐林,羊毅,等. 机载多脉冲激光雷达目标信号模拟器的研究[J]. 光学学报,2012,32(1):271-276.
MA P G, QI L, YANG Y, et al. Study on airborne multi-pulse lidar target signal simulator[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1):271-276.
- [6] 平庆伟,何佩琨,赵保军,等. 高分辨中远程激光测距机的数字信号处理研究[J]. 激光与红外,2003,33(4):261-264.
PING Q W, HE P K, ZHAO B J, et al. Study on digital signal processor of the high resolution middle and long range laser ranger[J]. Laser & Infrared, 2003, 33(4):261-264.
- [7] KNIGHT F K, KLICK D I, RYAN-HO WARD D P, et al. Three-dimensional imaging using a single laser pulse[J]. Proc. SPIE, 1103, Laser Radar IV, 174, 1989, doi:10.1117/12.960570.
- [8] 羊毅,倪旭翔,陆祖康,等. 脉冲激光模拟器[J]. 光电工程,2000,27(6):43-47.
YANG Y, NI X X, LU Z K, et al. A pulse laser simulator[J]. Opto-Electronic Engineering, 2000, 27(6):43-47.
- [9] 刘延峰,潘泉,张冠杰. 一种提高雷达作用距离的有效方法[J]. 控制与决策,2006,21(8):885-888.
LIU Y F, PAN Q, ZHANG G J. Efficient approach to enhance maximum radar range[J]. Control and Decision, 2006, 21(8):885-888.
- [10] (上接第 10 页)
YANG J, GAO W Y, LIU J. Threat assessment method based on Bayesian network[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 11(1):43-48.
- [5] 李望西,黄长强,吴文超,等. 空地精确制导武器对地攻击目标毁伤评估[J]. 系统工程理论与实践,2012,32(1):211-218.
LI W X, HUANG C Q, WU W C, et al. Battle damage assessment of air-to-ground precision guided weapon air-to-ground attack[J]. System Engineering—Theory & Practice, 2012, 32(1):211-218.
- [6] YAMADA K. Probability-possibility transformation based on evidence theory[C]//Proceeding of the IEEE IFSA World Congress, 2001, 1:70-75.
- [7] 李俊生,丁建立. 基于贝叶斯网络的航班延误传播分析[J]. 航空学报,2008,29(6):1598-1604.
LI J S, DING J L. Analysis of flight delay propagation using Bayesian networks[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(6):1598-1604.