

引用格式:张元生,仇振安,郭帅,等.机载激光通信系统关键技术分析与试验验证[J].电光与控制,2017,24(10):80-84. ZHANG Y S, QIU Z A, GUO S, et al. Key technology analysis of airborne laser communication system and its verification[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(10): 80-84.

机载激光通信系统关键技术分析与试验验证

张元生¹, 仇振安², 郭帅¹, 陈洪亮¹

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000;

2. 陆航驻洛阳地区军事代表机构, 河南 洛阳 471000)

摘要:介绍了机载激光通信系统的组成与工作原理,分析了机载激光通信系统涉及的关键技术。结合机载平台特点,完成了机载激光通信系统设计与样机研制,系统经地面测试和拉距试验。结果表明,该系统样机能够实现20~100 km的远距离通信,且误码率低于 10^{-6} 、通信带宽优于 $1.25 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}/155 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$,性能指标完全满足机载激光通信系统的设计要求。

关键词:机载平台;光通信;激光通信;系统设计;关键技术;试验验证

中图分类号: TP391 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2017.10.016

Key Technology Analysis of Airborne Laser Communication System and Its Verification

ZHANG Yuan-sheng¹, QIU Zhen-an², GUO Shuai¹, CHEN Hong-liang¹

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;

2. Military Representative Office of Army Aviation in Luoyang, Luoyang 471000, China)

Abstract: The composition and working principle of the airborne laser communication system are introduced, and analysis is made to the key technologies of the system. Based on the characteristics of airborne platform, the airborne laser communication system and the prototypes were designed, which were verified through ground test and distance test. The experimental results show that this system can realize 20 km to 100 km long-distance communication with bit-error-rate lower than 10^{-6} and communication bandwidth up to $1.25 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}/155 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$. The performance index can completely satisfy the design requirements.

Key words: airborne platform; optical communication; laser communication; system design; key technology; test verification

0 引言

机载激光通信技术是以激光为信息载体,以大气为传输媒介,使飞机等航空平台在空域实现语音、图像、数据等信息传输的一种光通信方式。与传统的机载无线电通信相比,激光通信具有通信容量大、传输速率高、抗电磁干扰强、保密性高、系统体积小、功耗低等优势,可与现有机载无线电通信有机结合,共同组成机群间宽带、高速、安全的军用通信系统^[1-3],有效提升飞机的通信保障能力和协同作战能力,提高战场信息化水平。

作为空天地一体化网络的重要节点和枢纽,机载平台的重要性日益突出。相对于星载、地面等平台,机载平台具有高机动、高振动、使用环境恶劣、体积功耗受限等特点,从而对激光通信系统提出了更高要求。本文重点对机载激光通信系统涉及的关键技术进行研究^[4-6]。

1 系统组成与工作原理

机载激光通信系统一般由光机分系统、捕获跟踪与瞄准(ATP)分系统、激光通信分系统3部分组成。光机分系统主要包括光学望远单元、中继单元、机械框架与平台等,是整个系统设计实现的基础,并负责集成、固定其他分系统;ATP分系统包括粗、精跟踪探测器和对应伺服系统,是激光通信链路建立的前提,保证两端光学天线间的精确对准;激光通信分系统主要包括信标激光器、信号激光器、信号发射单元、信号接收

收稿日期:2016-10-21

修回日期:2016-12-12

作者简介:张元生(1965—),男,河南南阳人,博士,研究员,研究方向为机载光电探测技术及光通讯技术。

单元、信号编码调制与解调模块等,是实现激光通信的功能主体,其中,信标激光用于目标指引,信号激光用于通信。机载激光通信系统的组成如图 1 所示。

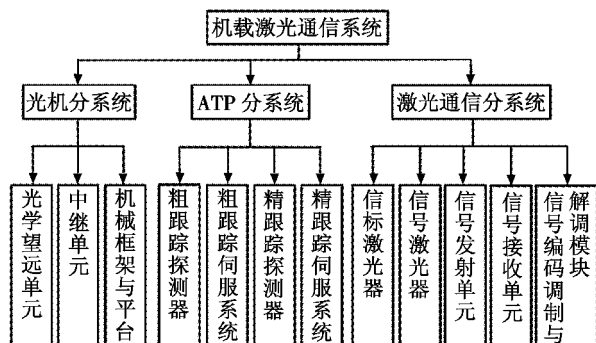


图 1 机载激光通信系统组成

Fig. 1 Composition of airborne laser communication system

机载激光通信系统间的初始对准一般由载机和目标机的 GPS 位置、姿态确定,通常通过无线电等链路交互获得对方的位置姿态信息;系统根据 GPS 等信息解算初始指向信息,由 ATP 分系统驱动系统框架快速完成对目标系统位置的初始指向,通过主动互发较大发射角的信标激光,指引双方实现快速的信标开环捕获,进入粗跟踪;目标信标激光进入载机精跟踪探测器视场后,通过高带宽的精跟踪伺服系统对粗跟踪残差进行实时精密补偿,进入精跟踪,实现信标激光精确覆盖对方光学孔径,完成两端系统光学天线间的精确对准,建立信标链路;完成信标链路后,载机将通信数据信息调制、加载入较小发散角的信号激光中,通过与信标激光光路精密同轴的信号发射天线发射,由目标端接收天线完成信号接收、探测和解调出通信数据,建立信号链路;双方互发信号激光,最终实现通信交互。

机载激光通信系统往往以系统通信性能作为总体设计要求,因此,通常以通信链路方面的通信距离、通信速率、误码率等主要指标来衡量系统性能。通信距离与通信速率是通信能力的直观体现,主要取决于具体的链路特性,不同高度、不同长度的空空、空地链路下,大气吸收散射与大气湍流度对通信链路具有不同的影响;误码率主要用来衡量通信的质量,不同的背景光环境、链路损耗与系统接收性能等因素导致接收与发射比特序列也不同,即误码,是对数据传输可靠性的量化^[7-9]。

2 系统关键技术分析

机载平台具有高机动、高振动的特点,大气链路的时变性与复杂度对通信的影响远高于光纤、地基、天基等其他平台,因此,如何在机动条件下快速建立并保持大气环境的动态通信是机载激光通信系统应用面临的关键问题。同时,高振动的机载平台使用环境限制,对

机载激光通信系统的体积、功耗与环境适应性也提出了特定的要求^[10-11]。对此,归纳机载激光通信系统关键技术如下。

1) 对机动目标的快速捕获技术。

与星载平台位置可查、姿态低频扰动小等不同,平台无参考、载机高机动特性、机间相对位置/姿态和速度变化快等因素,使得机载平台的目标捕获不确定区域较大,严重影响目标信标捕获效率,因此,如何实现作战飞机间快速捕获对方来建立通信连接是机载激光通信系统实用化所必须解决的技术问题。当前的机载激光通信终端多使用转塔构型,主要是由于其内置的稳定平台能够隔离机载平台的宽谱振动,保持视轴稳定和对场景的稳定成像,同时还具有快速驱动指向能力和全向搜索范围,可应对空中各个方向通信节点的传输要求。当前的初始对准多是采用 GPS 设备结合 INS 惯导设备等手段,通过无线电等射频链路交互初始位置与姿态信息,指引系统至大概目标区域,通过较大视场直接捕获或较小视场的区域扫描,来实现目标的快速捕获。

2) 高精度跟踪瞄准技术。

机载激光通信的光束发散角一般在 $50 \mu\text{rad} \sim 2 \text{ mrad}$,要实现激光通信必须使双方的激光光斑持续覆盖对方光学孔径,这就需要光学天线的实时高精度对准,其跟踪精度往往要求在数十微弧度以内;尽管天线孔径处通常有信标指引,但在高机动、高振动的机载条件下,对光学天线的高精度对准与实时跟踪能力提出了极高的要求。当前多采用粗精两级复合轴跟踪控制,在粗跟踪捕获后利用快速振镜(FSM)的精跟踪控制,提升系统伺服带宽,实时补偿粗跟踪的中低频残差,抑制平台的高频振动,以实现高频振动机载环境下稳定的光通信连接^[12]。

3) 机载大气环境高速光通信技术。

当前对机载高速安全通信的潜在需求强烈,但目前并未有装备机载激光通信系统的报道,这主要是由于空基链路光束基本都在大气中传输,更易受到大气衰减和湍流的影响;即使两端保持精确对准,系统接收光功率的衰减和随机起伏,依然会显著降低系统的性能与可用性。同时,平台的高空环境,诸如低温、低压、气动、背景光干扰等因素,也对系统的性能与环境适应性提出了挑战。然而,复杂天气条件下的机载大气信道特性国内外罕有报道,因此,研究不同类型大气信道(飞机对飞机、飞机对地、地对飞机)对机载激光通信系统影响机理就显得尤为必要,只有充分考虑机载平台的使用条件,提出缓解大气信道各种效应的有效方法,诸如光纤耦合、信道编码、自适应光学等,才能有效

降低大气信道对系统性能的影响。

4) 系统小型化、模块化设计技术。

机载激光通信系统集成信标/信号激光、光学天线、伺服机构和通信单元等多个光路与组件,结构复杂,又面临着机载平台体积、重量和功耗的苛刻限制,这就要求系统高度集成。纵观国外样机发展,已从多孔径到共孔径、转塔尺寸/功耗从大到小、光学中继减少平台载荷(光学天线与激光器、信号处理模块分离)、应用自适应光学减小光学孔径等多个方面来小型化系统。因此,必须在保证性能要求的同时,优化系统布局,进行功能分区、模块化设计,以有效减小系统总体尺寸与重量,提升工程化水平。

3 系统设计与验证

本文针对有人机与无人机协同作战时的通信保障需求,开展应用于机群间安全通信的机载激光通信系统设计。系统性能要求如下:

1) 通信速率, $1.25 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}/155 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ (2套系统采用非平衡数据速率设计,高速率用于无人机高清图像数据回传,低速率用于有人机控制指令传递);

2) 通信距离, $20 \sim 100 \text{ km}$ (误码率小于 10^{-6} 的条件下)。

3.1 机载激光通信系统设计方案

结合前文分析,机载激光通信系统采用信标激光指引、信号激光通信的模式;为满足机载平台光学天线实时对准需求,采用粗精两级复合跟踪控制实现机载大气信标、信号链路的快速高效建立。该系统采用两轴四框的转塔构型,考虑主要由粗跟踪、激光通信、电视等3个分系统组成,如图2所示。

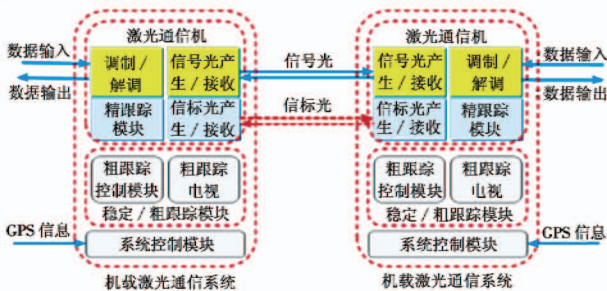


图2 机载激光通信系统工作组成框图

Fig.2 Block diagram of airborne laser communication system

系统主要组成与工作流程如下:

1) 系统控制模块包括总体控制板、图像处理板、电源板等组件,可将目标机与本机的GPS、姿态等信息解算后,发送至粗跟踪分系统;

2) 粗跟踪分系统由外方位/外俯仰电机、码盘、内平台电机、陀螺等组成,通过解算信息完成GPS初始指向、跟踪,同时有效隔离载机角振动,稳定系统光轴;

3) 电视分系统是一个可变视场的CCD相机,主要针对目标机/信标激光进行成像处理,并向粗跟踪分系统在远近距离内提供足够视场;

4) 激光通信分系统由控制机箱、精跟踪图像处理板、精跟踪CMOS相机、精跟踪快速透镜(FSM)、通信编/解码模块、EDFA放大器、信标激光器、信号激光器、激光发射/接收光学天线等组成,主要对信标激光实时精跟踪对准、抑制粗跟踪残差、对信号调制/解调和对信息编解码。

3.2 系统链路仿真分析

机载激光通信系统设计时,对系统指标进行大致分配,必须确保经大气信道链路后目标端的接收光功率满足接收灵敏度要求。系统链路指标分配可参考空地激光通信系统链路传输方程

$$P_r = P_t \times \eta_t \times \left(\frac{D}{\theta R} \right)^2 \times L_t \times L_0 \times L_r \times \eta_r \quad (1)$$

式中: P_t 为载机激光发射功率; P_r 为目标机接收到的功率; L_r 和 L_t 分别为接收和发射瞄准误差; η_r 和 η_t 分别为接收天线及发射天线的天线效率; θ 为激光光束的发散角; D 为接收天线口径; L_0 为大气信道对激光传输产生衰减的衰减系数; R 为大气传输距离。载机发射激光经链路存在一系列损耗,按照链路传输方向分解,主要包括以下损耗:发射/接收天线损耗;几何损耗;发射/接收瞄准误差引起的损耗;大气信道引起的损耗。

以下对 $20 \sim 100 \text{ km}$ 距离的激光通信链路损耗进行分析。

1) 发射/接收天线损耗 η_t 和 η_r 。发射与接收天线为相同设计,根据光路中光学元件数量和透过率换算,损耗均为 1.8 dB 。

2) 几何损耗 $\left(\frac{D}{\theta R} \right)^2$ 。以系统接收孔径 D 为 100 mm 、信号激光发散角 θ 为 $200 \mu\text{rad}$ 、信标激光发散角为 2 mrad 为例,通信距离 $20 \sim 100 \text{ km}$ 的信号链路几何损耗为 $-32 \sim -46 \text{ dB}$,信标链路几何损耗为 $-52 \sim -66 \text{ dB}$ 。

3) 发射/接收瞄准误差引起的损耗 L_t 和 L_r 。发射瞄准误差精度 θ_t 与接收瞄准误差 θ_r 精度相等,以 $10 \mu\text{rad}$ 为例,信号链路发射/接收瞄准误差引起的损耗约为 -0.087 dB ,考虑装配误差,可统一取 -1 dB 。

4) 大气信道引起的损耗 L_0 。大气信道引起的损耗主要包括大气衰减和湍流两部分。其中,大气衰减方面通过PcModWin软件,对海拔 $1 \sim 5 \text{ km}$,信标 808 nm 、信号 1550 nm 的大气透过率进行仿真计算,如图3、图4所示。计算可知,海拔高度 5 km 、通信距离 $20 \sim 100 \text{ km}$ 条件下, 808 nm 信标光大气衰减为 $-0.7 \sim -3.4 \text{ dB}$; 1550 nm 信号光大气衰减为 $-0.27 \sim -1.02 \text{ dB}$ 。

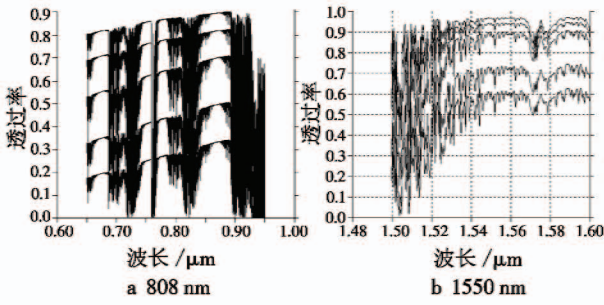


图 3 1~5 km 海拔水平 20 km 链路大气透过率
Fig. 3 Atmospheric transmittance at 1~5 km height and 20 km range

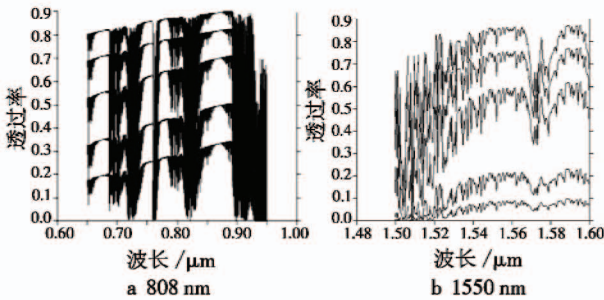


图 4 1~5 km 海拔水平 100 km 链路大气透过率
Fig. 4 Atmospheric transmittance at 1~5 km height and 100 km range

另外,大气湍流影响主要体现在湍流闪烁和湍流散斑方面;5 km 高度、100 km 链路的湍流闪烁的衰减远小于散斑影响,取保守值 -5 dB;湍流散斑易引起视轴抖动,将严重影响接收耦合效率。中弱湍流条件下,取折射率湍流结构常数 C_n^2 为 6×10^{-16} ,对 100 mm 口径,结合视轴抖动方差公式

$$\sigma_\beta^2 = \frac{1.093 \times L \times C_n^2}{D^{1/3}} \quad (2)$$

得 100 km 条件下大气湍流散斑衰减约为 -4.7 dB,因此,大气湍流引起的损耗取值为 -10 dB。

3.3 关键技术解决方案

针对机载激光通信系统的关键技术,对应解决方案如下。

1) 对机动目标的快速捕获。

要实现对目标的快速捕获,必须确定对目标的开环捕获不确定区域。以无人机速度 300 km/h 和有人机速度 900 km/h 为例,最大相对速度 1200 km/h。则 20~100 km 距离范围内,目标机相对载机运动范围为 1.7~8.3 mrad,因此综合 GPS 偏差,选取视场较大、可对信标光成像的 CCD 电视进行粗跟踪探测,其最小视场 16 mrad,满足粗跟踪捕获视场要求,且不需区域扫描,减少了捕获时间。另外,协同作战时机间距离变化范围较大,而粗跟踪电视最大视场达 418 mrad,具备最小 2 km 的近距离目标快速捕获能力。

2) 高精度跟踪瞄准。

为保证 ATP 精跟踪系统闭环带宽达到 200 Hz,要求探测器帧频为其 8 倍以上。系统选择较为成熟的 CMOS 探测,分辨率达 2 μ rad,通过开窗处理,实现视场(250 μ rad)与粗跟踪精度耦合的情况下窗口帧频 2 kHz 以上,满足系统的稳定跟踪带宽要求。来自高帧频 CMOS 的信标光斑位置解算,通过 FPGA 中的质心算法实现;以光斑位置为实时反馈,通过单环 PID 数字控制器,根据环境变化自动优化选择控制参数,实现对执行机构 FSM 的高速控制,保证对目标机信标光斑 10 μ rad 的实时跟踪。

3) 机载大气环境高速光通信技术。

通过对机载环境下大气信道机理研究,在满足系统性能要求的同时,充分考虑“发射系统—大气链路—接收系统”的各部分损耗;在此基础上,对精跟踪回路、信标/信号激光器、光学天线等模块进一步指标分配,同时根据具体实现技术的设计及研制反馈结果迭代协调,优化设计。激光光学天线布局原理如图 5 所示。另外,还需进行信标/信号收发多个光轴的高精度装调。

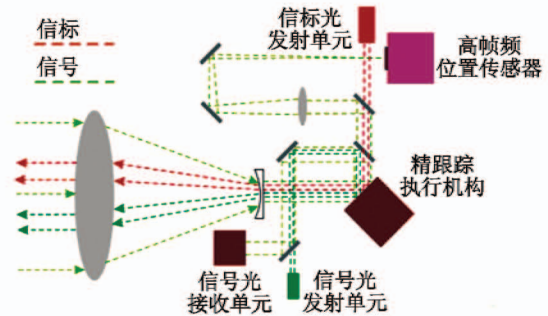


图 5 光学天线原理图

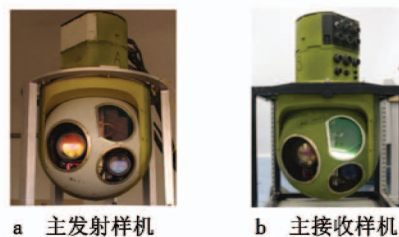
Fig. 5 Optical antenna schematic

4) 系统小型化、模块化设计。

机载激光通信系统采用信标/信号激光收发共孔径设计,结构紧凑;通过光纤耦合等手段,将激光器、激光电源、数据编解码、图像处理等模块外置,并集成到激光控制机箱,减轻平台载荷,以有效降低系统尺寸与重量。

3.4 系统地面验证

经过功能联试与性能调试,完成了一套/两台样机的研制,实物如图 6 所示。



a 主发射样机 b 主接收样机

图 6 机载激光通信系统样机实物图

Fig. 6 Airborne laser communication system prototype

在地面定点 4.2 km 距离、转台模拟飞机机动的条件下,通过衰减发射功率的方式,进行了与空中 20 km 距离等效的通信试验验证,实现双向 $1.25 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}/155 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ 速率的视频通信。并在 $2.5 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}/155 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率下,进行多次 60 s 以上的误码测试,误码率在 $1.7 \times 10^{-8}/1.2 \times 10^{-7}$ 以下,满足考核指标要求;同时对跟踪性能进行了测试,粗、精跟踪精度分别为 $20 \mu\text{rad}$ 和 $5 \mu\text{rad}$,满足性能要求。由于激光器为大功率激光器,难以衰减至与 100 km 距离等效的低功率;但实际测试时,20 km 等效衰减通信时接收孔径处光功率约为 -15 dBm ,而通信机接收灵敏度在 -32 dBm 以下,链路余量在 17 dB 以上,理论通信距离大于 100 km,满足系统设计要求。

另外,还进行了外场通信拉距等效试验,受试验条件限制,最终拉距距离约 6.8 km, $1.25 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}/155 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ 速率的通信画面图像清晰,通信效果良好,误码率满足指标要求。

4 结束语

本文结合机载平台特点,分析了机载激光通信系统的关键技术,并通过系统设计研制了一套样机,完成了等效地面试验;未来还需在系统小型化、相干通信体制、自适应光学等新技术方面开展研究,以进一步改进现有系统。随着机载平台重要性的逐渐提高,各国均已开始发展高带宽、高保密、抗干扰的机载激光通信系统,其与射频通信相互配合,将能有效提升战机的通信保障能力和体系对抗下各武器平台的作战效能,发展前景广阔。

参 考 文 献

[1] 姜会林,刘志刚,佟首峰,等. 机载激光通信环境适应

性及关键技术分析[J]. 红外与激光工程,2007,36(s):299-302.

[2] 赵鑫,王世峰,佟首峰,等. 飞机-地面间激光通信天线的初始对准[J]. 光学精密工程,2008,16(7):1190-1195.

[3] 刘庭杰,陈玉茹. 机载激光通信特点与应用简介[J]. 硅谷,2012(12):117-118.

[4] 姜会林,佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京:国防工业出版社,2010.

[5] 付强,姜会林,王晓曼,等. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. 中国光学,2012,5(2):116-125.

[6] 曾飞,高世杰,伞晓刚,等. 机载激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学,2016,9(1):65-73.

[7] 孟立新. 机载激光通信捕获与跟踪技术研究[D]. 吉林:吉林大学,2014.

[8] BISWAS A, PAGE N, NEAL J, et al. Airborne optical communications demonstrator design and pre-flight test results[C]//Proceedings of SPIE 5712, 2005:205-216.

[9] MAYNARD J A, BEGLEY D. Airborne laser communications: past, present and future[C]//Free-Space Laser Communications V, Proceedings of SPIE 5892, 2005. doi: 10.1117/12.621222.

[10] FLETCHER T M, CUNNINGHAM J, BABER D, et al. Observations of atmospheric effects for FALCON laser-communication system flight test[C]//Atmospheric Propagation VIII, Proceedings of SPIE 8038, 2011. doi:10.1117/12.887407.

[11] 刘红军. 美军机载射频与 FSO 混合通信发展述评[J]. 电讯技术,2014,54(12):1711-1716.

[12] 孟立新,赵丁选,张立中,等. 机载激光通信稳瞄吊舱设计与跟踪精度测试[J]. 兵工学报,2015,36(10):1916-1923.

(上接第 79 页)

[5] ARINC. Aircraft data network. Part 7: Avionics Full-Duplex Switched Ethernet (AFDX) network[S]. Annapolis: Aero-

nautical Radio, 2005:9-18.

[6] 洪锡军,陈彩贞,李从心. Windows 下高精度定时的实现[J]. 计算机应用研究,2000,17(3):96-97.