

CD-ROM

无线通信系统仿真：

IT++分析与实例

刘林 王平 陈红◎等编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

无线通信系统仿真： IT++分析与实例

刘 林 王 平 陈 红
马 征 郝 莉 李恒超

编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

通过软件工具、系统建模与仿真方法进行通信系统设计、分析、验证和性能评估,已成为现代通信网络企业和研发部门的必然选择。在众多的仿真软件中,IT++是基于C++语言的信号处理和通信方面的开放式免费仿真库函数工具,由于其综合了Matlab的功能和C语言的速度,被广泛应用于通信系统建模、分析和设计。

本书系统地讨论了通信系统的设计、分析和仿真方法,全部仿真程序都是采用IT++编写的。首先介绍IT++仿真平台,并对IT++的基本库做了详细的说明;然后对通信系统中的重要内容,例如无线信道、信道编码与交织、数字信号处理、数字调制解调等展开详细的描述;接着给出OFDM与扩频通信、MIMO检测的仿真;最后通过LTE链路级仿真的实例,向读者介绍IT++仿真平台的使用。

本书适合作为高等院校通信与信息系统、信号处理、计算机应用等专业低年级研究生或通信工程专业高年级本科生相关课程的教材,也可以作为研究部门和通信企业研发人员的实用手册。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

无线通信系统仿真:IT++分析与实例/刘林等编著. —北京:电子工业出版社,2012.7
ISBN 978-7-121-17440-7

I. ①无… II. ①刘… III. ①无线电通信—通信系统—系统仿真 IV. ①TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第135819号

责任编辑:田宏峰 特约编辑:牛雪峰

印 刷:北京丰源印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×980 1/16 印张:21.5 字数:480千字

印 次:2012年7月第1次印刷

印 数:4 000 定价:59.00元(含光盘1张)



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

序

现代通信系统在性能不断提高的同时也变得越来越复杂，而市场竞争还要求通信产品开发周期更短、成本更低、可靠性更高。要解决这些尖锐对立的矛盾，通过软件工具、系统建模与仿真方法进行通信系统设计、分析、验证和性能评估，成为现代通信网络企业和研发部门的必然选择。基于计算机软件的通信系统仿真具有廉价性、高效性和灵活性等特点，因而发展十分迅速。目前，已出现大量商用和免费仿真软件与工具，可以满足从电路器件层、物理层、链路层、网络层等多种仿真设计与分析需求，如 Matlab、SystemView、OPNET、QualNET、OMNET++、SPW、Ptolemy、NS2、Cossap、SitePlanner SPICE 和 IT++等。其中，IT++是基于 C++语言的信号处理和通信方面的开放式免费仿真库函数工具，可广泛用于通信系统建模、分析和设计。学习与运用 IT++，既有利于培养通信专业学生 C++语言的编程能力，同时也可培养学生综合运用专业知识进行通信系统设计的能力。

本书不仅系统地讨论了通信系统的设计、分析和仿真方法，而且提供了大量具有参考价值的仿真实例。本书的全部仿真程序都是采用 IT++编写的，可方便读者理解仿真实现过程，也允许读者自行修改或使用这些代码进行特定的通信仿真开发。本书作者利用 IT++完成了包括国家 863 计划项目在内的多项科研任务，本书内容正是他们科研成果的总结。

我相信本书非常适合作为高等院校通信与信息系统、信号处理、计算机应用等专业低年级研究生或通信工程专业高年级本科生相关课程的教材，也可以作为研究部门和通信企业研发人员的实用手册。

范平志
2012年6月

前 言

随着通信技术的迅猛发展，无线通信系统的功能越来越强、性能越来越高。另一方面，通信系统技术研究和产品开发的周期越来越短。强大的计算机辅助分析设计技术和仿真工具的出现为解决以上两个问题提供了有力的支撑。

本书着重介绍了 IT++ 仿真工具的运用方法，尤其是在无线通信仿真中的应用，通过丰富的实例来加深读者对无线通信系统仿真的理解和掌握。全书共分 9 章，第 1 章介绍 IT++ 软件包及安装方法；第 2 章介绍 IT++ 基本库，包括常用的数据类型定义，常用的数学函数如三角函数、指数函数等的定义及使用方法；第 3~7 章介绍 IT++ 中与通信系统有关的库函数及其仿真实现过程，包括信道、编码、调制、OFDM、扩频，等等；第 8 章以 MIMO 检测算法为例，介绍 IT++ 在无线通信系统仿真中的运用。最后，第 9 章以 LTE 链路级仿真为例介绍移动通信系统的设计和仿真过程。

本书适用于通信行业的大专院校学生和研究人员，既可以作为初学者的入门教材，也可以用做中高级读者和研究人员的速查手册。

本书在撰写过程中，得到了许多同行和专家的鼓励和帮助。感谢“通信工程品牌专业”建设项目的支持，感谢西南交通大学教改项目的支持，感谢范平志教授为本书作序，感谢西南交通大学信息编码与传输实验室研究生：刘子月、董月、温沛霖、郭瑞、李强、周维曦、赵婧、赵明、顾艳红、周恩治、万兴福等，感谢你们为本书所付出的辛苦工作！同时也感谢在本书的讲义试用期间为本书提出修改意见的同学和朋友们。作者在此一并致谢。

由于时间仓促和水平有限，错误之处在所难免，恳请读者提出宝贵意见。

编著者

于西南交通大学

目录

CONTENTS

第 1 章 IT++软件平台基础	1
1.1 IT++简介	1
1.2 IT++安装	1
1.2.1 系统要求	1
1.2.2 安装 IT++	2
1.3 IT++使用	7
第 2 章 IT++基本库	10
2.1 IT++数据类型	10
2.1.1 预定义标量类型	10
2.1.2 预定义矢量类型	10
2.1.3 预定义矩阵类型	13
2.2 数组、矢量和矩阵类	13
2.3 数学函数	14
2.3.1 误差函数	14
2.3.2 双曲线函数	15
2.3.3 对数和指数函数	15
2.3.4 混杂数学函数	17
2.3.5 数值积分	20
2.3.6 三角函数	21
2.4 贝塞尔函数	22
2.5 类型转换函数	23
2.6 矩阵相关函数	27
2.6.1 对角矩阵函数	27

2.6.2	矩阵运算函数	28
2.6.3	重塑向量和矩阵	29
2.6.4	特殊矩阵	30
2.7	线性代数	31
2.7.1	行列式计算	31
2.7.2	矩阵求逆	31
2.7.3	矩阵分解	31
2.7.4	线性方程组求解	33
2.8	随机数产生模块	36
2.9	统计模块	43
2.9.1	直方图	43
2.9.2	混杂统计函数	44
2.9.3	混合高斯函数	47
2.10	mex-文件模块	50
第3章	无线信道仿真	53
3.1	无线信道概述	53
3.2	无线通信信道模型与仿真	54
3.2.1	衰落信道模型	55
3.2.2	平坦衰落信道仿真	56
3.2.3	频率选择性衰落信道仿真	57
3.3	信道模块中类的定义和头文件	57
3.3.1	类的定义	57
3.3.2	信道模块中的枚举类型	59
3.4	平坦衰落信道	59
3.4.1	Fading_Generator 类	60
3.4.2	Independent_Fading_Generator 类	61
3.4.3	Static_Fading_Generator 类	64
3.4.4	Correlated_Fading_Generator 类	67
3.4.5	Rice_Fading_Generator 类	68
3.4.6	FIR_Fading_Generator 类	73
3.4.7	IFFT_Fading_Generator 类	76
3.5	channel_specification 类	79
3.5.1	成员函数	79
3.5.2	重点函数说明	80

3.6	基于抽头延迟线模型的频率选择性信道.....	82
3.6.1	TDL_Channel 的成员函数.....	82
3.6.2	重点函数说明.....	84
3.6.3	实例.....	85
3.7	二进制对称信道模型.....	87
3.7.1	二进制对称信道 (BSC) 类的成员函数.....	87
3.7.2	重点函数说明.....	87
3.7.3	实例.....	88
3.8	高斯信道.....	88
3.8.1	高斯信道 (AWGN_Channel) 类的成员函数.....	88
3.8.2	重点函数说明.....	89
3.8.3	实例.....	90
第 4 章	信道编码与交织.....	94
4.1	信道编码简介.....	94
4.2	前向纠错码模块中的类.....	100
4.2.1	类的定义及头文件.....	100
4.2.2	前向纠错码模块类的枚举类型.....	101
4.3	线性分组码.....	101
4.3.1	BCH 码类.....	101
4.3.2	扩展格雷码类.....	102
4.3.3	汉明码类.....	105
4.3.4	RS 码类.....	107
4.4	CRC 类.....	110
4.4.1	CRC 类的成员函数.....	110
4.4.2	重点函数使用方法.....	111
4.4.3	CRC 实例.....	111
4.5	卷积码.....	112
4.5.1	Convolutional_Code 类.....	112
4.5.2	Punctured_Convolutional_Code 类.....	125
4.5.3	递归系统卷积码.....	133
4.6	Turbo 码.....	138
4.6.1	Turbo 码类及函数.....	138
4.6.2	重要函数说明.....	139
4.6.3	Turbo 编译码示例.....	146

4.7	交织器	151
4.7.1	类的定义及头文件	152
4.7.2	分组交织器	152
4.7.3	交叉交织器	154
4.7.4	序列交织	157
4.8	LR_calc_unit 类（对数似然代数计算单元）	159
4.8.1	成员函数	160
4.8.2	重要函数说明	161
第 5 章	数字信号处理	163
5.1	傅里叶变换	163
5.1.1	傅里叶变换函数	166
5.1.2	重点函数使用方法	167
5.2	数值优化	170
5.2.1	类及函数	170
5.2.2	重点函数使用方法	172
5.2.3	数值优化实例	173
5.3	滤波器	176
5.3.1	滤波器类	177
5.3.2	滤波器函数	179
5.3.3	重点函数说明	180
5.3.4	滤波器实例	183
第 6 章	数字调制/解调	185
6.1	概述	185
6.1.1	数字调制/解调基本原理	185
6.1.2	数字调制类的定义	187
6.2	Modulator 类	188
6.3	正交幅度调制（QAM）	194
6.3.1	基本原理	194
6.3.2	成员函数	195
6.3.3	重点函数说明	197
6.3.4	QAM 调制/解调实例	197
6.4	相位调制	199
6.4.1	基本原理	199
6.4.2	MPSK	199

6.4.3	QPSK	201
6.4.4	BPSK_c 类	205
6.4.5	BPSK	208
6.5	PAM	211
6.5.1	基本原理	211
6.5.2	PAM_c 类	212
6.5.3	PAM 类	214
6.6	MIMO 调制器	216
6.6.1	基本原理	216
6.6.2	Modulator_ND 类	217
6.6.3	Modulator_NRD 类	219
6.6.4	Modulator_NCD 类	223
6.6.5	ND_UPAM 类	225
6.6.6	ND_UQAM 类	228
6.6.7	ND_UPSK 类	231
第 7 章	OFDM 与扩频系统	235
7.1	概述	235
7.2	OFDM	236
7.2.1	基本原理	236
7.2.2	OFDM 类的定义和头文件	239
7.2.3	重要函数解析	240
7.2.4	实例	242
7.3	扩频系统	245
7.3.1	基本原理	245
7.3.2	扩频类的定义和头文件	247
7.3.3	重点函数解析	250
7.3.4	实例	253
7.4	辅助功能函数	255
7.5	序列	258
7.5.1	二进制线性反馈移位寄存器	258
7.5.2	Gold 序列	260
7.5.3	正交扩频码	263
第 8 章	MIMO 检测	266
8.1	概述	266

8.2	MIMO 信道模型	266
8.3	MIMO 检测算法	268
8.3.1	最大似然检测 (MLD) 算法原理	268
8.3.2	线性迫零 (ZF) 均衡检测算法	269
8.3.3	线性最小均方误差 (MMSE) 均衡检测算法	269
8.3.4	迫零判决反馈均衡 (ZF-DFE) 检测算法	270
8.3.5	采用 V-BLAST 的 ZF-DFE (ZF-VB DFE) 检测算法	271
8.3.6	球形译码 (SD) 算法	273
8.4	算法实例	277
8.5	仿真结果	292
第 9 章	LTE 链路级仿真	294
9.1	链路级仿真	294
9.2	设计方案	295
9.2.1	类的设计	295
9.2.2	类的实现	297
9.3	仿真实例分析	307
9.3.1	编码块分段与码块级联	307
9.3.2	循环冗余校验 (CRC) 及混合自动重传请求 (HARQ)	308
9.3.3	Turbo 码编码及块内交织器优化	309
9.3.4	速率匹配与冗余版本	312
9.3.5	调制/解调及信道仿真	313
9.3.6	仿真结果	313
9.4	本章小结	317
附录 A		318
参考文献		333

第1章 IT++软件平台基础

1.1 IT++简介

IT++库是由瑞典查尔姆斯理工大学前信息理论部门创建的，主要用于模拟通信系统并进行通信相关领域的研究。由于在编写类库时使用的是C++语言，故命名为IT++。IT++已经发展成为具备自身特色的通信仿真软件，综合了Matlab的功能和C语言的速度，适合于通信信号处理等领域。目前，无论是高校还是通信公司，研究人员已经广泛采用IT++进行通信系统的仿真或者研究。

和其他软件相比，IT++具有以下优点。

运算速率和编程效率高：IT++广泛采用现有的开源或商用类库来增强自身功能和提升软件运行速度及准确性，特别是BLAS、LAPAK和FFTW类的使用。它通过采用ATLAS、MKL和ACML等优化平台类库，大大提高了计算速率。由于IT++是基于C++语言的，因此它继承了C++的各项优势。在进行IT++仿真程序的编写时，实际是在编写C++程序。由于IT++的类库中集成了许多通信仿真的基本函数和类，在仿真程序编写时可以直接调用所需类的成员函数，因此大大提高了仿真程序的编写效率。

全系统仿真：IT++是基于事件的协议仿真软件，它能对通信系统从物理层到协议层进行仿真。

多系统兼容：IT++能够在GNU/Linux，Sun Solaris，Microsoft Windows（已安装Cygwin，MinGW/MSYS或Microsoft Visual C++）和Mac OS X等操作系统上运行。

1.2 IT++安装

1.2.1 系统要求

IT++可以在GNU/Linux、BSD、UNIX和Windows系统下运行。在微软的Windows NT/2000/XP系统下，可以在Microsoft Visual C++ .NET等平台上使用。对于GNU/Linux，FreeBSD和Solaris SunOS，Cygwin和MinGW系统，需要预先安装相应的GNU软件。

1.2.2 安装 IT++

在 Visual C++ Express 2005 软件环境下, 要使用 IT++ 的函数库, 首先要编译一个静态库。以下是完整的安装编译过程。

(1) 下载并安装 Visual C++ Express 2005。这个安装非常简单, 但需要一个较快的网速, 因为安装过程要下载一个 300 MB 的软件包, 如果你喜欢本地安装, 也可以从刻录的 CD 中安装。

(2) 下载并安装微软的 SDK 平台。调用 IT++ 的实时函数需要安装一个免费的包, 有三种选择: 网络安装, 下载整个安装包安装或者从刻录的 CD 上安装。安装时可以选择部分需要的函数包。SDK 的安装界面如图 1-1 所示。

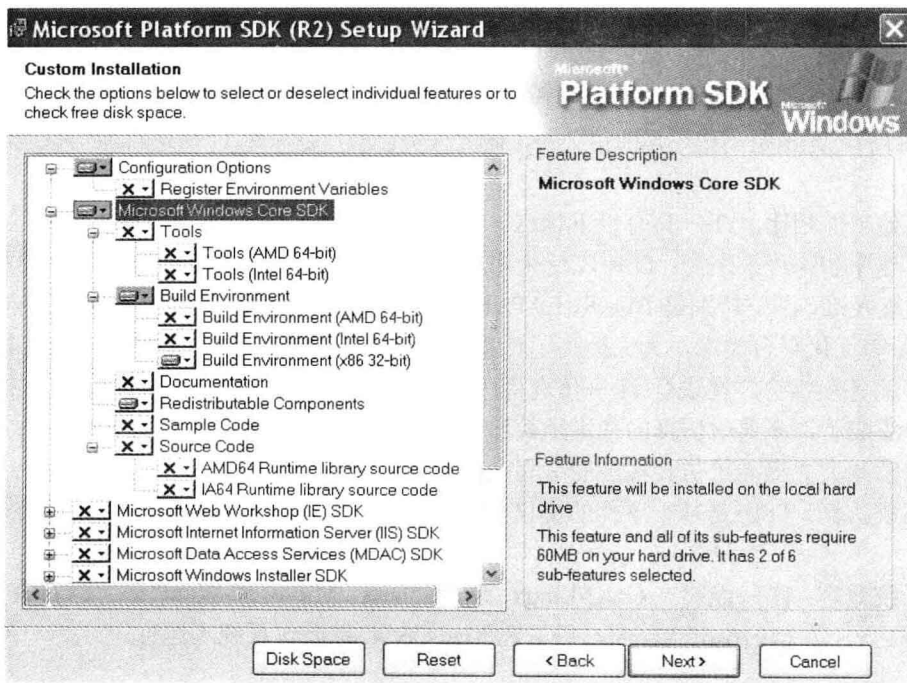


图 1-1 SDK 安装界面

完成 SDK 平台的安装以后, 就可以使用 Visual C++ 2005。

(3) 下载并安装 IT++ Version 4.0.6 (建议安装在 C 盘的根目录下)。

(4) 编译 IT++ 库。编译 IT++ 库的步骤如下:

- ① 在安装 IT++ 的子目录 (\itpp-4.0.6) 下创建子文件夹 lib。
- ② 复制以下文件到 lib 这个子目录。

```
blas wi32.lib
lapack win32.lib
```

```
libfftw3-3.lib
```

③ 复制以下文件到子目录 \windows\system32。

```
blas win32.dll
lapack win32.dll
libfftw3-3.dll
```

④ 启动 Visual C++ 2005，打开并编辑文件 config_msvc.h。此文件位于\itpp-4.0.6\itpp。用

```
#if defined (HAVE_ACML) || defined (HAVE_MKL) || defined (HAVE_FFTW3)
```

替换第三行的

```
#if defined (HAVE_ACML) || defined (HAVE_MKL)
```

并保存修改。

⑤ 下载文件 fftw3.h 并保存在目录\itpp-4.0.6\itpp 下；编辑文件\itpp-4.0.6\itpp\signal\transforms.cpp，并将该文件第 48 行修改为

```
#include <itpp/fftw3.h>
```

注意保存修改的文件。

⑥ 打开位于 C:\itpp-4.0.6\win32 目录下的工程 itpp_mkl.sln。在默认情况下，这个工程是调试模式的，即生成库将包含调试符号。这些符号允许调试器在调试期间给出有用的信息。在编译之前，需修改以下项目属性（项目/属性菜单），如图 1-2 到图 1-5 所示（图中显示的是最后的设置结果）。

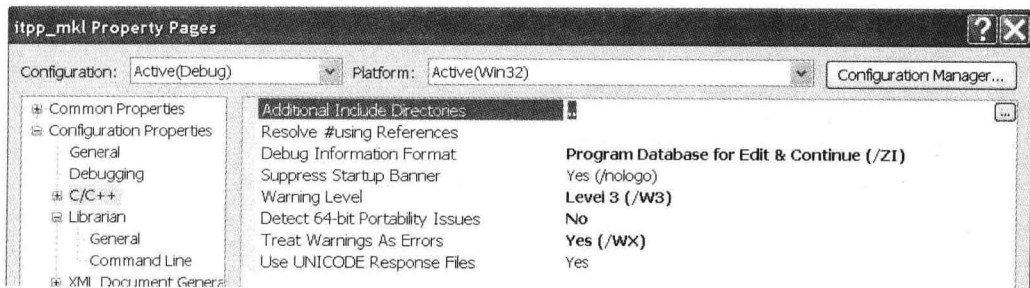


图 1-2 C/C++语言的属性

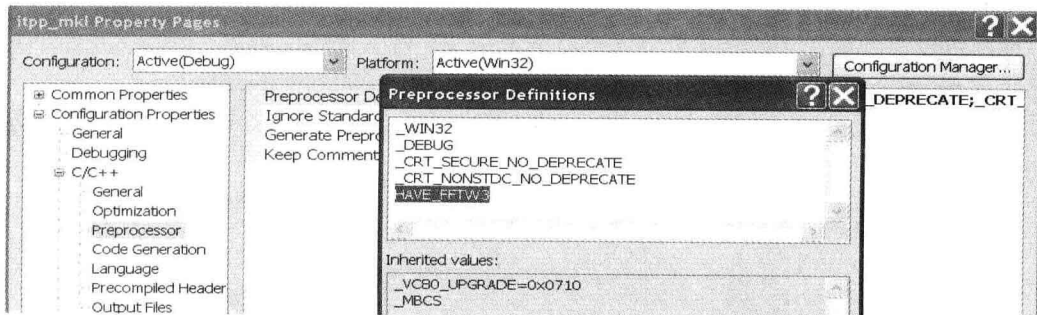


图 1-3 C/C++预处理设置

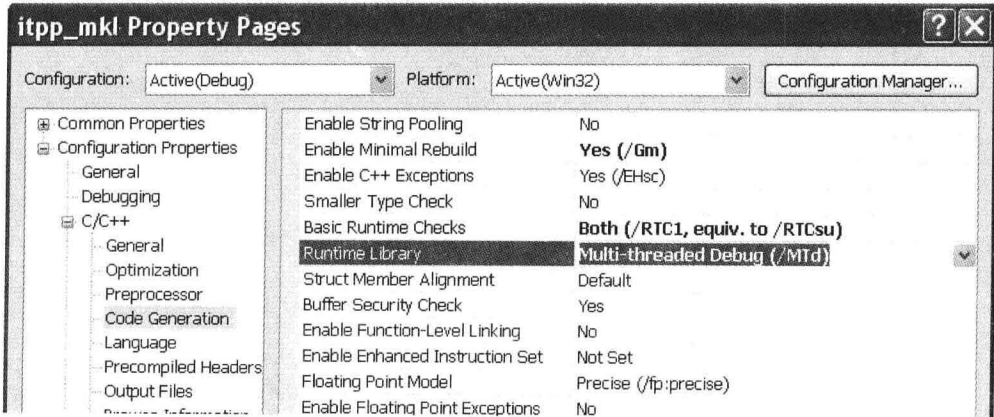


图 1-4 C/C++代码生成器的设置

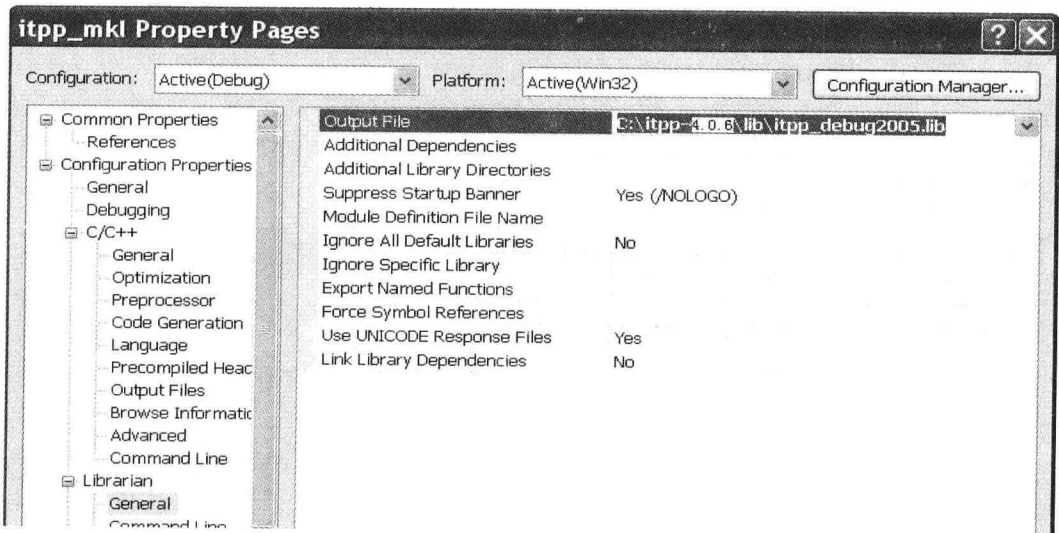


图 1-5 生成库的设置

现在可以启动编译（建立生成方案菜单或者按 F7 键）调试库函数。若运行正常的话，在子目录 lib 下会找到一个 61 MB 的、文件名为 itpp-debug2005.lib 的文件。

⑦ 继续用 Release 版本编译 IT++ 库，即将解决方案配置从 Debug 模式改成 Release 模式，如图 1-6 所示。

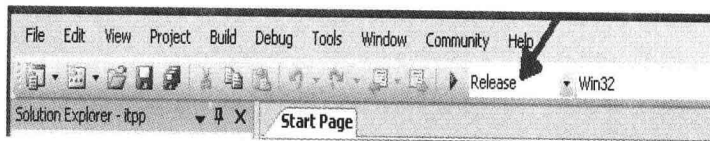


图 1-6 编译模式设置

在编译之前，还需要修改以下的项目属性（项目/属性菜单），如图 1-7 到图 1-11 所示。

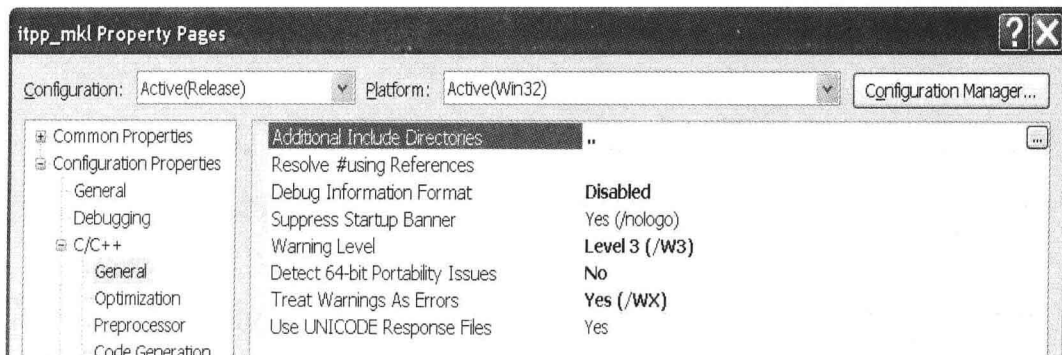


图 1-7 C/C++生成器设置

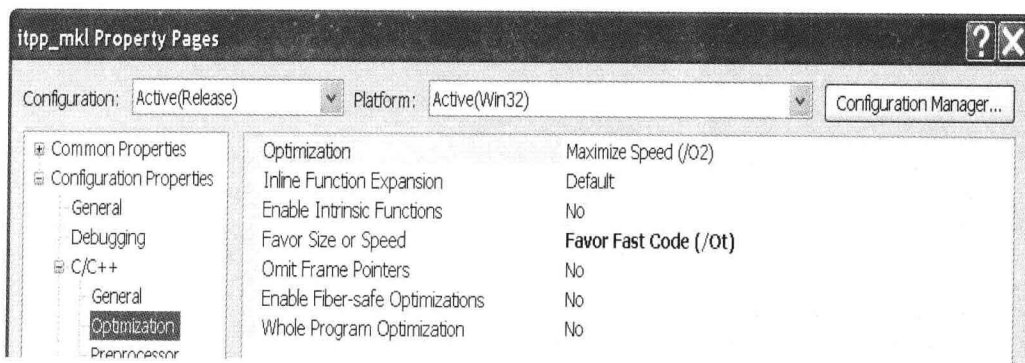


图 1-8 C/C++最优化设置

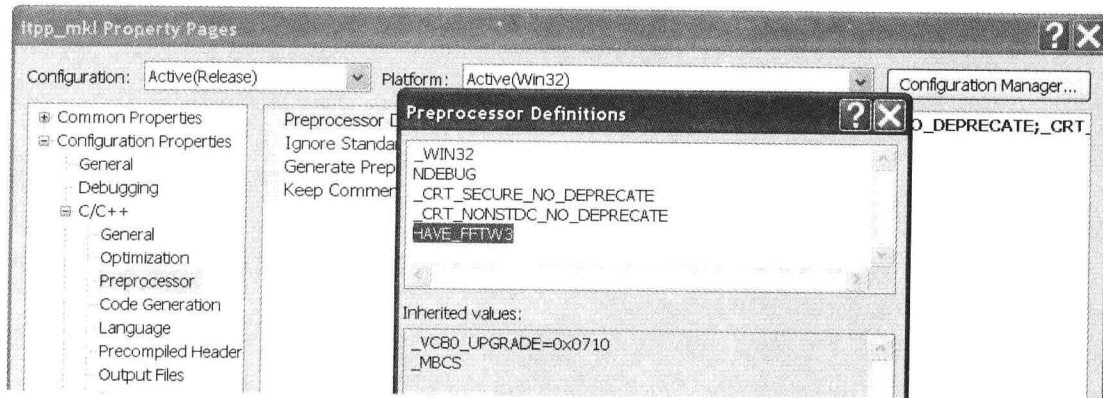


图 1-9 C/C++预处理设置

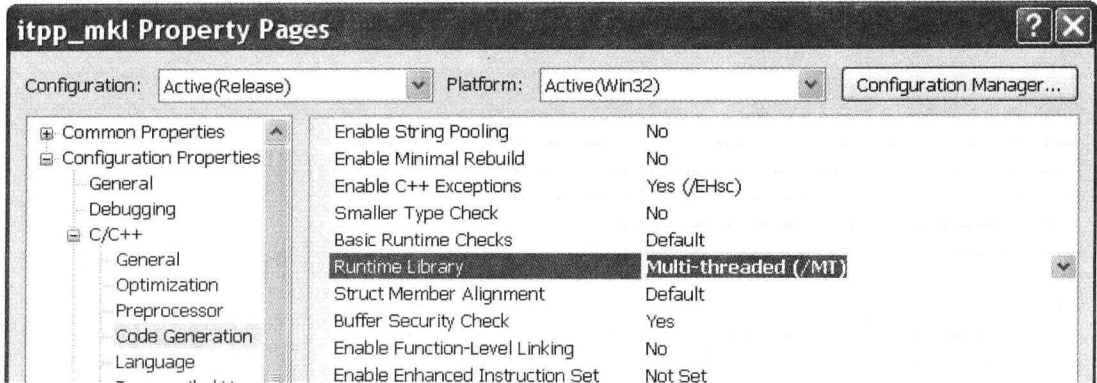


图 1-10 C/C++代码生成器设置

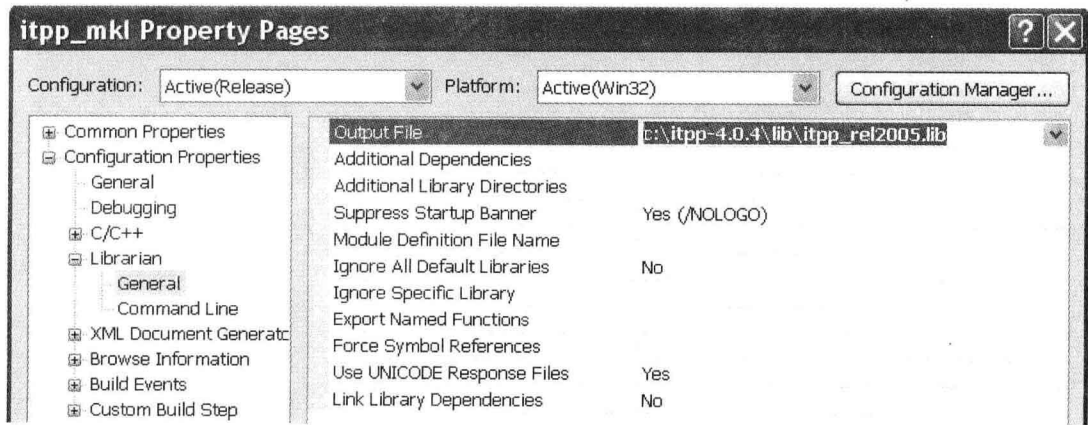


图 1-11 生成库设置

现在开始编译（建立/生成解决方案菜单或者按 F7 键），对 Release 版本生成库。若一切正常，就能在 lib 的子目录下找到一个名为 itpp-rel2005.lib 的、大小为 16 MB 的文件。这类库中包含的代码要比 Debug 模式快得多。

现在已经建立了 IT++库的连接，下面就可以开始建立自己的 IT++应用程序。为了简化建立的过程，可以创建一个自动创建项目的模板。

(5) 下载模板 Wizard(itpp_matmex_vc_express.zip)。将下载的文件解压到目录 C:\Program Files\Microsoft Visual Studio 8\VC\Express。

假如把 IT++安装在 C 盘根目录下，这不需要做任何事情。如果 IT++安装在其他的目录下，需要编辑文件 C:\Program Files\Microsoft Visual Studio 8\VC\VCWizards\AppWiz\Generic\IT++\Scripts\1033\default.js 并且修改以下两行，将路径改为相应的安装路径。

```
var ITPP_LIB_PATH = "C:\\itpp-4.0.6\\lib";
var ITPP_INC_PATH = "C:\\itpp-4.0.6\\";
```