

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.05.013

引用格式:李健,邹浩杰,陈杰.多星座卫星导航接收机跟踪通道结构改进[J].电讯技术,2014,54(5):595-599. [LI Jian,ZOU Hao-jie,CHEN Jie. Structure Improvement of Tracking Channels in Multi-constellation Satellite Navigation Receiver[J]. Telecommunication Engineering, 2014,54(5):595-599.]

多星座卫星导航接收机跟踪通道结构改进*

李健**,邹浩杰,陈杰

(中国科学院微电子研究所,北京 100029)

摘要:可用卫星数量的大幅增加使得传统的并行通道结构很难满足多星座卫星导航接收机的设计需求。为了减少电路规模和功耗,提出了一种通用的相关器跟踪结构,其可以跟踪 GPS(Global Positioning System)/BDS(BeiDou Navigation Satellite System)/GLONASS(Global Navigation Satellite System) 3 种卫星信号。该电路通过预先存储中频数据、提高相关器工作频率的方法,充分利用了每个通道的效能。这种时分复用的电路改进方法可以实现大量等效并行通道。65 nm 工艺下的实验结果表明,该结构在电路资源和功耗方面优于传统结构。FPGA(Field Programmable Gate Array)的验证结果进一步证明了该电路结构的有效性和正确性。

关键词:GPS;“北斗”系统;GLONASS;多星座;导航接收机;跟踪通道;时分复用

中图分类号:TN962 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)05-0595-05

Structure Improvement of Tracking Channels in Multi-constellation Satellite Navigation Receiver

LI Jian,ZOU Hao-jie,CHEN Jie

(Institute of Microelectronics,Chinese Academy of Sciences,Beijing 100029,China)

Abstract:The structure of traditional paralleled channels could hardly meet the demand of multi-constellation satellite navigation receiver as the tremendous increase of available satellites. In order to reduce the excessive consumption of circuits and power,this paper presents a universal correlator structure which can track GPS(Global Positioning System)/BDS(BeiDou Navigation Satellite System)/GLONASS(Global Navigation Satellite System) signals. By storing intermediate frequency(IF) signals previously and enhancing the frequency of correlators,this circuit takes full advantage of every channel. Large scale equivalent channels can be easily implemented through TDM(Time Division Multiplexing) methods. The research under 65 nm technic shows that new structure outperforms traditional one in circuit resources and power consumption. FPGA(Field Programmable Gate Array) simulation also demonstrates the validity and correctness of this circuit.

Key words:GPS;BeiDou navigation system;GLONASS;multi-constellation;navigation receiver;tracking channel;time division multiplexing

1 引言

从 20 世纪 60 年代初期的子午仪卫星导航系统

(NNSS,即美国海军导航卫星系统)开始,目前在轨和计划开发的全球卫星导航系统有美国的 GPS、俄

* 收稿日期:2013-12-17;修回日期:2014-02-26 Received date:2013-12-17;Revised date:2014-02-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61376027,61221004)

Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No. 61376027,61221004)

** 通讯作者:lijian@ime.ac.cn Corresponding author:lijian@ime.ac.cn

罗斯的 GLONASS、欧洲的 GALILEO、中国的“北斗” (BDS)。此外,还有众多的区域增强系统,例如日本的 QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) 和印度的 IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System)。多种卫星导航系统的发展使得导航接收机可用于定位的卫星数量大幅增加,极大地改善了用户在复杂环境下的体验,使得定位的精确度、稳定性和完好性都有长足甚至巨大的提高^[1]。如何实现多模卫星导航接收机已经成为目前的设计热点与难点。

多模卫星导航接收机要实现定位需要对卫星信号进行实时的跟踪与解调。传统的接收机采用并行的相关器通道来实现卫星信号的实时跟踪^[2],但是随着可见卫星数量的增多,硬件资源会大幅增加,且电路自身的功耗也会相应提高。

尽管不同卫星导航系统的调制方式有所差别,但是其大部分都采用了 QPSK 与扩频通信相结合的调制方式,相关通道可以采用相同的结构实现多星座卫星的兼容。文献[3]介绍了 GPS/GLONASS/GALILEO 接收机的通用相关器结构,文献[4]针对多模多频接收机提出了软件跟踪平台,但文献[3-4]均并未对硬件实现多星座跟踪进行深入分析。文献[5]详细分析了 GPS 相关器的实现方法,其采用了 16.367 MHz 的较低工作频率,使得通道效能无法得到充分发挥。文献[6]以 GPS 信号为例分析了采样率与前端带宽对于信号强度的影响,指出采用 4 倍码速率的采样率可以近似无失真的恢复信号,因此相关通道可以工作在更低的频率。相关运算的低速率决定了可以通过时分复用的方式提高每个通道的工作频率,进一步发挥每个物理通道的效能。

本文首先在传统相关器结构基础上,通过改进码发生器实现了 GPS/BDS/GLONASS 3 种系统兼容。然后,通过适量存储中频数据和对触发器结构改造实现了大规模等效相关通道。FPGA 的仿真结果表明,该电路结构可以实现 3 种导航系统的实时跟踪。最后,给出了 65 nm 工艺下与传统方案的对比,相对于传统并行相关器通道结构,该方法在电路规模和功耗方面具有优势,且随着等效通道数的增加,这种优势越为显著。

2 多模跟踪通道

跟踪本质上是实时的复现与接收信号完全同步的本地信号^[7],由本地复制的载波信号可以提取出多普勒频移和载波相位观测值,由本地伪码信号又

可以提取出码相位和伪距测量值,而这些参数可以用于接收机定位。

卫星信号经过天线、低噪声放大器、射频前端、AD 采样后得到如下中频信号:

$$r(t) = AD(t)C(t)\cos[2\pi(f_c + \delta f)t + \varphi] + n(t) \quad (1)$$

其中, A 表示信号幅度, $D(t)$ 表示调制的电文信息, $C(t)$ 表示测距码, f_c 表示载波中频值, δf 表示载波多普勒频率, φ 为输入载波和本地载波的相位差, $n(t)$ 表示高斯白噪声信号。尽管不同星座卫星的码速率、码产生方式、调制电文、载波中心频点不同,但是其均可以通过相关通道结构进行跟踪,如图 1 所示。

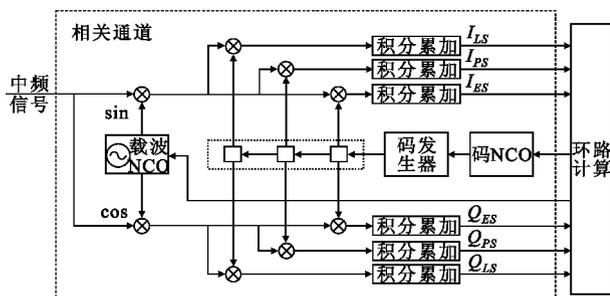


图 1 相关通道结构

Fig. 1 Structure of correlation channel

数字中频信号首先与本地产生的正弦和余弦载波进行混频,混频结果与复制的伪随机码进行相关,接着相关结果 I 和 Q 再送给载波环和码跟踪环进行本地载波和伪码频率的调整,实现实时的卫星信号跟踪。

尽管 GPS、BDS 和 GLONASS 系统的码速率和码长不同,但是通过比较其码产生方式可以发现其具有一些共性。GPS 和 BDS 系统可以通过两组码产生器合成最终码字,而 GLONASS 系统仅使用其中一组码产生器即可生成伪随机序列。其码产生器结构如图 2 所示,通过配置两组码产生器的抽头和码初相就可以实现不同系统的码产生。

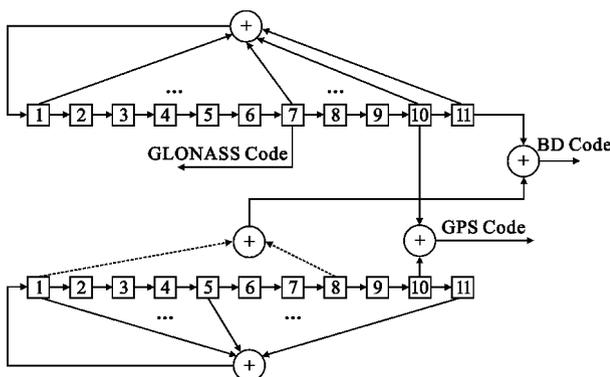


图 2 兼容 GPS/BDS/GLONASS 的码产生器

Fig. 2 Code generator for GPS/BDS/GLONASS

文献[6]采用了零中频的跟踪结构, 并证明了采样率大于等于 4 倍前端单边带宽时, 相关能量损失可以忽略不计。对于 GPS 信号来说, 假设前端射频带宽为 2.046 MHz, 如果相关通道使用 4.092 MHz 的采样率就可以基本无失真的恢复信号。这种低速率的工作特点使得传统并行通道结构无法充分发挥每个通道的效率, 在多星座接收机中, 会造成电路资源的浪费。

3 改进的通道结构

由于相关器通道工作的频率较低, 因此可以利用时分复用的技术, 通过提高每个通道的工作频率来实现更多的等效通道。为了达到该目的, 需要预先缓存中频信号, 然后通过控制电路来提高中频数据回放的速率, 进而实现大量等效通道。

以 8 个物理通道为例, 如图 3 所示, 该电路工作流程为: 中频信号首先存储到中频 RAM1 中, 当 RAM1 存满后, 数据存入 RAM2 中。此时, RAM1 的数据通过多路选择器送给通道 1~8 做相关运算, 运算完成后 8 个通道的中间触发器的值顺序移位到 DUMP RAM 中。如果还需要实现更多的通道可以先从 DUMP RAM 中顺序移出其他通道的触发器值, 再回放 RAM1 中的中频数据。如此反复操作直到实现等效的通道数。

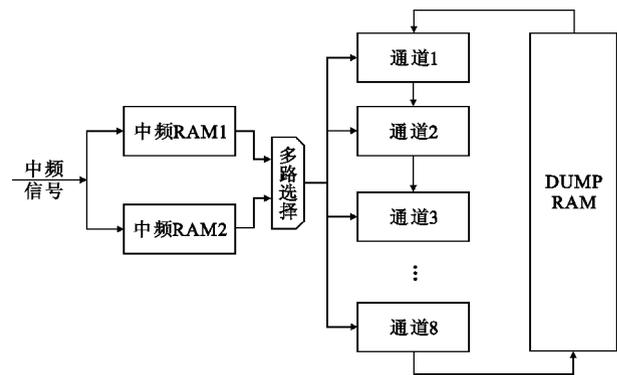


图 3 基于中频数据回放的跟踪通道

Fig. 3 Tracking channels based on playback of IF signals

为了实现上述功能, 需要对触发器进行适当改造。如图 4 所示, 具体方法是在触发器前端增加两级 MUX(二选一) 电路, 其中选择器 1 为低电平选择正常逻辑输入 SI, 为高电平则进入移位模式, 可以锁存前级触发器 RDI 的值。选择器 2 为低电平则进入移位模式, 为高电平则进入锁存模式, 维持自身的值不变。

图 4(b) 为插入扫描链后的触发器模型^[8], 对比

两种结构可以发现选择器 2 为高电平的情况下两种电路结构完全等价, 因此改进后的电路可以在完成扫描设计工作后手工修改, 对于电路改动不大。

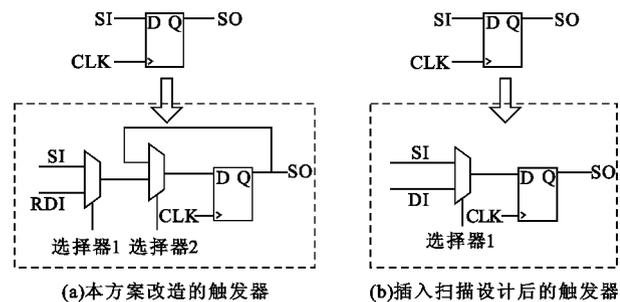


图 4 改造后的触发器与插入扫描链后的触发器

Fig. 4 Modified trigger and trigger after scan chain is inserted

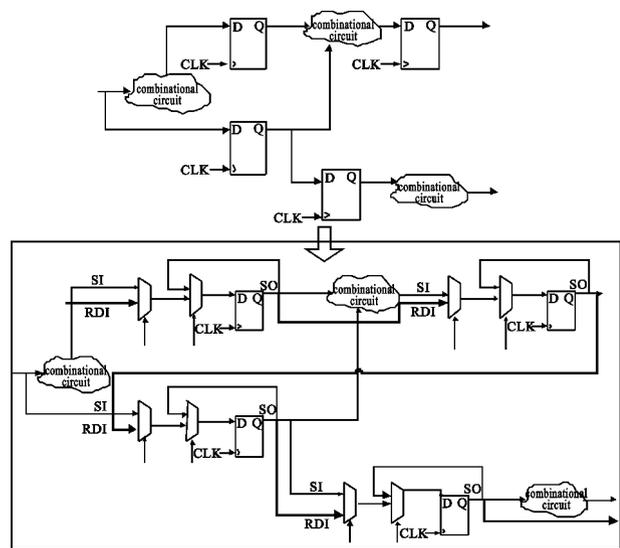


图 5 电路改造示意图

Fig. 5 A demo of modified circuits

最后将所有触发器通过如图 5 所示粗线路径连接到一起即可实现所有触发器值的移出和移入。通过上面分析可以得到等效相关器的计算公式为

$$N = N_{phy} \frac{f_H}{f_s} \cdot \frac{M_{ram}}{M_{ram} + M_{in} + M_{out}} \quad (2)$$

其中, N_{phy} 为实际物理通道数, f_H 为通道工作频率, 而 f_s 为采样率, M_{ram} 为中频 RAM 的深度, M_{in} 为触发器装载初始值的周期数, M_{out} 为触发器数据移出的周期数。以 $N_{phy} = 8$, $f_H = 100 \text{ MHz}$, $f_s = 16.368 \text{ MHz}$, $M_{in} = M_{out} = 1000$, $M_{ram} = 8192$ 为例, 可以计算得到 $N \approx 40$, 即 8 个物理通道可以实现 40 个等效通道。

4 实验结果

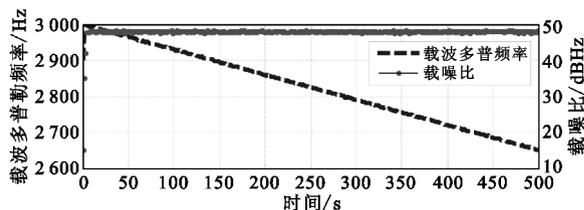
为了验证跟踪通道的实际效果, 本实验电路全部用 FPGA (Altera StratixIII EP3LS200) 实现, 其中控

制部分采用 S3C2410(ARM9) 芯片实现。本实验模拟器采用东方联星公司的 NS800 多星座卫星导航信号模拟器,产生 GPS、BDS、GLONASS 静态场景数据。射频芯片采用 Maxim 公司的 max2769 芯片,中频采用 2 比特量化,采样率 16.368 MHz。

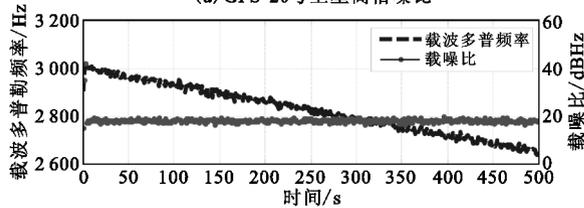
在实验中,为了简化设计只采用了 4 个物理通道,而电路工作速度为 50 MHz。由式(2)可以计算出其等效通道数为 12。

由于射频芯片不支持 3 种系统同时接收,因此通过模拟器分别产生 GPS/BDS/GLONASS 3 种卫星场景。每种场景的卫星强度逐次降低,通过配置码发生器的类型即可实现不同卫星的跟踪。其中,环路控制部分代码由控制芯片来完成,而基带相关器通道全部在 FPGA 内部实现。

图 6~8 分别是对 GPS 系统 20 号卫星、BDS 系统 5 号卫星、GLONASS 系统 11 号卫星的跟踪结果。从跟踪结果可以看出,基于回放方式的相关器通道可以稳定地跟踪高信噪比和低信噪比的卫星信号。



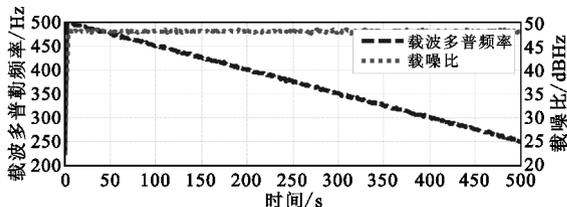
(a) GPS 20号卫星高信噪比



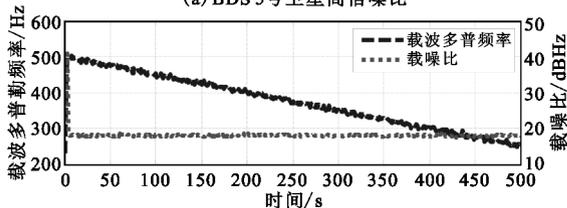
(b) GPS 20号卫星低信噪比

图 6 GPS 20 号卫星跟踪结果

Fig. 6 Tracking result of GPS sat 20



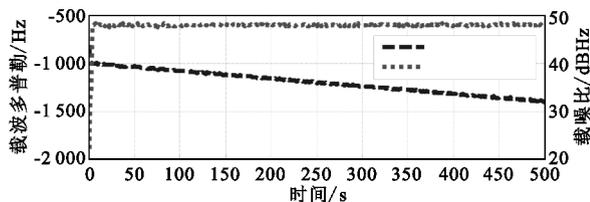
(a) BDS 5号卫星高信噪比



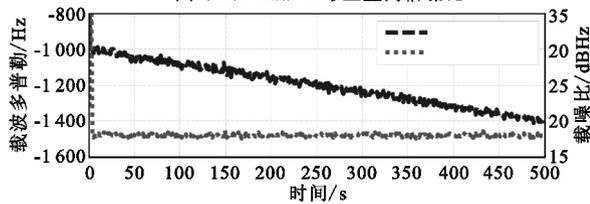
(b) BDS 5号卫星低信噪比

图 7 BDS 5 号卫星跟踪结果

Fig. 7 Tracking result of BDS sat 5



(a) GLONASS 11号卫星高信噪比



(b) GLONASS 11号卫星低信噪比

图 8 GLONASS 11 号卫星跟踪结果

Fig. 8 Tracking result of GLONASS sat 11

改进电路由逻辑电路和存储器构成,存储器包含 6 块中频 RAM 和 1 块 DUMP RAM。前者分别存储 3 种卫星信号的中频数据,后者存储触发器的中间结果。使用 Synopsys 公司的 Design Compiler 工具在 SMIC 65 nm 工艺下对两种方案电路进行综合对比,可以得到结果如表 1 所示。

表 1 65 nm 工艺下的综合结果对比

Table 1 Comparison of synthesis results under 65 nm technic

等效通道	逻辑电路/mm ²		存储器/mm ²		总计/mm ²	
	传统电路	改进电路	传统电路	改进电路	传统电路	改进电路
12	0.331	0.185	无	0.173	0.331	0.358
24	0.668	0.185	无	0.180	0.668	0.365
48	1.390	0.185	无	0.204	1.390	0.389

由表 1 可以看出,随着通道数的增加,传统并行通道的硬件资源呈线性增加的趋势,而改进电路主要依靠提高自身工作频率,其电路增加的部分为存储中间结果的 DUMP RAM 大小,因此电路规模的增加并不明显。

在本实验中,中频 RAM 的大小为 512×32 b,由于采用 2 比特采样,因此对应 M_{ram} 为 8 192。 M_{ram} 的值越大,式(2)中等效通道数越大,但是其会带来电路规模的增加。 M_{in} 和 M_{out} 与通道中触发器的个数有关,相关电路一旦设计完成该参数基本固定。因此提高等效通道数的关键在于提高本地相关器的工作频率或者降低中频信号采样率。

最后,通过测试激励使得全部通道处于跟踪状态,使用 Synopsys 公司的 Power Compiler 工具在 SMIC 65 nm 工艺下对两种方案电路进行功耗分析,可以得到如表 2 所示的结果(核心电压为 1.2 V)。

表 2 65nm 工艺下的功耗对比

Table 2 Comparison of power consumption under 65 nm technic

等效通道	功耗/mW		时钟/MHz	
	传统电路	改进电路	传统电路	改进电路
12	7.92	8.5	16.367	50
24	16.20	16.0	16.367	100
48	33.40	30.0	16.367	200

由表 2 可以看出,在等效通道数量达到 24 以后,改进电路的功耗要优于传统电路。需要说明的是,在实验中改进电路的 RAM 均增加了门控电路装置,在 RAM 空闲时关闭 RAM 的时钟,否则其功耗会大幅增加。

5 结 论

本文提出了一种改进的 GPS/BDS/GLONASS 接收机跟踪通道结构,该电路结构通过重新设计码发生器,实现了 GPS/BDS/GLONASS 系统的兼容。通过预先存储中频数据并高速回放的方式提高了各通道的工作效率。FPGA 的实验结果证明了该电路的可行性和有效性。采用 SMIC 65 nm 工艺对硬件资源和功耗进行分析,结果表明:在进行大量相关通道设计时,该方法相对于传统的并行通道结构具有更小的硬件资源、更低的功耗和更高的灵活性。随着等效通道数的增加,该电路结构在硬件资源和功耗方面的优势越发显著,其更适合于多星座多通道类型的接收机设计。由于零中频电路的采样率更低,因此下一步还将研究针对零中频方案的多星座跟踪电路,以实现更高的等效通道数。

参考文献:

- [1] Misra P, Enge P. 全球定位系统——信号,测量与性能 [M]. 2 版. 罗鸣,曹冲,肖雄兵,等,译. 北京:电子工业出版社,2008:69.
Misra P, Enge P. GPS system: signal, measurement and Performance [M]. 2nd ed. Translated by LUO Ming, CAO Chong, XIAO Xiong-bing, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008:69. (in Chinese)
- [2] Tsui, Bao-yen J. Fundamentals of global positioning system receivers; a software approach [M]. 2nd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005:168.
- [3] Kovar P, Kacmarik P, Vejrazka F. Low complex interoperable GNSS signal processor and its performance [C]// Proceedings of 2010 IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium. Indian Wells, CA, USA: IEEE,

2010:947-951.

- [4] Curran J T, Petovello M, Lachapelle G. Design paradigms for Multi-Constellation Multi-Frequency software GNSS receivers [C]// Proceedings of 2013 China Satellite Navigation Conference. Wuhan: IEEE, 2013: 751-756.
- [5] 王尔申,张淑芳,胡青,等. GPS 接收机相关器技术研究及 FPGA 实现 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(13): 3582-3585.
WANG Er-shen, ZHANG Shu-fang, HU Qing, et al. GPS correlator research and FPGA implementation [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(13): 3582-3585. (in Chinese)
- [6] 刘瀛翔,唐小妹,王飞雪. 卫星导航接收机中积分清零器的性能分析 [J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(2): 104-108.
LIU Ying-xiang, TANG Xiao-mei, WANG Fei-xue. Performance of integrate and dump filters in GNSS receivers [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(2): 104-108. (in Chinese)
- [7] 谢钢. GPS 原理与接收机设计 [M]. 北京:电子工业出版社, 2009:266.
XIE Gang. GPS Principle and Receiver Design [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2009:266. (in Chinese)
- [8] Laung-Terng W, WU Cheng-wen, WEN Xiao-qing. VLSI test principles and architectures design for testability [M]. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 2006: 56.

作者简介:



李健 (1981—), 男, 天津人, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为卫星导航接收机;

LI Jian was born in Tianjin, in 1981. He is now an associate research fellow and currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns satellite navigation receiver.

Email: lijian@ime.ac.cn

邹浩杰 (1988—), 男, 江苏人, 硕士研究生, 主要研究方向为 ASIC 电路设计;

ZOU Hao-jie was born in Jiangsu Province, in 1988. He is now a graduate student. His research concerns ASIC design.

陈杰 (1963—), 男, 湖北人, 2004 年于日本国立电气通信大学获博士学位, 现为研究员、博士生导师, 主要研究方向为无线通信。

CHEN Jie was born in Hubei Province, in 1963. He is now a research fellow and also the Ph. D. supervisor. His research concerns wireless communications.