

# 基于多建筑阻挡概率的平流层多径信道模型

牛志升, 刘 嵩, 吴佑寿

(微波与数字通信国家重点实验室, 清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 本文在单反射几何模型的基础上, 提出了用于预测平流层通信信道功率延时扩展和空间能量分布的信道传播模型. 一个用于确定空间中不同单反射路径存在概率的地面多建筑阻挡模型在文中被提出, 同时给出了确定此概率的计算方法. 在所提模型的基础上本文最后给出了一个平流层信道多径分量时空联合分布的典型结果.

**关键词:** 障碍; 多径信道; 几何模型; 平流层平台通信

**中图分类号:** TN929 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 12A-132-04

## A Blockage Based Channel Model for High Altitude Platform Communications

NIU Zhi-sheng, LIU Song, WU You-shou

(State Key Lab on Microwave and Digital Communications, Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Referring to the geometrically based single bounce (GBSB) model, a new geo-propagation model is proposed to predict the delay spread as well as the direction-of-arrival of multipath components in channels for high altitude platform station (HAPS) communications. Furthermore, an approach to calculate the probability of existence of single bounce paths caused by building blockages is given. By using the model, numerical simulation gives the power delay profile and the joint time-angle spread of the HAPS channels.

**Key words:** blockage; multipath channel; geometrical model; HAPS

### 1 引言

近年来, 平流层平台通信, 又称 HAPs (High Altitude Platforms) 通信, 作为传统地面通信技术和卫星通信技术的补充和扩展手段, 日益受到重视. 平流层通信, 是以长期维持于海拔 17-22km 左右的高空 (平流层) 并保持相对稳定的飞艇或飞行器为平台, 通过其机载设备实现通讯、遥感和数字广播等信息服务<sup>[1]</sup>. 与卫星通信系统相比, 平流层系统具有平台造价低廉、组网方式灵活、传播路径短等优点; 与陆地通信系统相比, 平流层系统的覆盖范围更广阔, 也更容易得到视线传播 (LOS: line-of-sight) 路径<sup>[2]</sup>. 这些极为诱人的特点, 使平流层通信系统非常适合未来的移动多媒体通信. 同时, 通过平台之间的互联以及与地面、卫星通信系统的结合, 平流层系统大大增加了各种通信业务在无线环境下应用的可行性.

迄今为止, 在平流层通信的研究领域, 大部分工作集中于平台的制造与飞行问题, 在具体通信技术方面的成果十分有限. 在缺少对平流层通信信道有效描述的情况下, 几乎没有专门的研究提出适合于平流层通信的信号传输与数据处理技术<sup>[3]</sup>. 然而, 在无线通信系统中, 宽带数据的传输不可避免的会受到多径传播的影响. 尽管在平流层信道中, 更容易获得直达路径, 但是从已有的基于卫星信道的仿真与实测数据说明<sup>[4]</sup>, 多径分量对接收信号码间串扰 (ISI: intersymbol interference) 的影响不可完全忽略. 特别是在平流层系统中, 百兆比

特甚至千兆比特速率的宽带业务将得到应用, 例如 LMDS, 它们对无线信号的传播环境将更为敏感. 因此, 对平流层多径信道传播特性的分析仍然是十分必要的.

为了估算平流层信道的多径延时扩展特性, 在文献[5]针对陆地信道的单反射 GBSB 模型的基础上, 文献[3]提出了一个三维椭球信道模型, 并给出了一个相当简洁的计算公式. 然而, 由于此模型所基于的假设不能反映信道的真实情况, 其计算结果也与实际分析存在着明显的偏差. 因此, 本文提出了一个基于地面建筑阻挡的传播模型, 对此三维描述方法加以改进. 通过引入单反射路径的存在概率, 改进模型可以得到更符合真实环境的信道特性描述.

本文以下分为三个部分: 第二节分析了现有三维信道模型的缺陷; 第三节提出了描述单反射路径存在概率的阻挡模型, 并给出了相应的计算方法; 在此改进模型的基础上, 第四节对平流层多径信道特性进行了分析, 并与原有模型的预测结果进行了比较以说明改进效果.

### 2 椭球信道模型及其缺陷

文献[3]提出的椭球信道模型的基本假设源于二维 GBSB 模型的单反射原理. 假设各种反射 (散射) 物体均匀分布在无线信号的传播空间之中, 且它们具有相同的散射截面 (scattering cross section), 如果我们只考虑仅经过一次反射的多径信号分量对接收信号的贡献而忽略多次反射的影响, 根据几何原

理,所有传播延时在  $t_0$  和  $t_0 +$  之间的反射分量都位于一个以发射点和接收点为焦点的椭球之中,其中  $t_0$  为直达路径 (LOS) 的传播时间,为多径延时 (excess delay). 因为信号反射主要由地面物体 (如建筑物、树和电线杆) 造成,我们可以合理的认为所有反射体只存在于一个距离地面有限高度内的空间中,如图 1 所示. 如果设接收点的坐标为  $(x_0, 0, 0)$ , 发射点 (平流层平台) 的坐标为  $(0, 0, z_0)$ , 则此空间可以近似表示为:

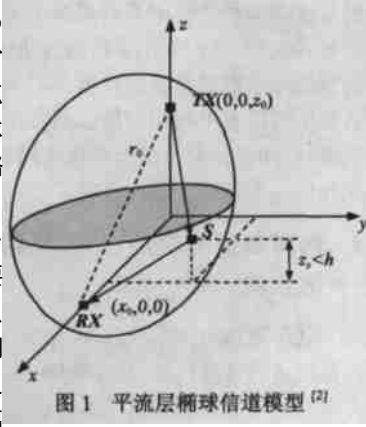


图 1 平流层椭球信道模型 (2)

其中,  $h$  代表了散射物体可能所处的高度范围,  $k(\cdot)$  是延时的传播路径长度. 基于上述均匀分布的假设, 在延时  $\tau$  内到达接收点的单反射分量的数量是与此空间的体积  $V(\cdot)$  成正比的. 通过计算  $V(\cdot)$ , 就可以利用公式 (2) 得到多径分量随延时的累计概率分布 (CDF):

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_0)^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{x^2 + y^2 + (z-z_0)^2} < k(\cdot) \\ 0 < z < h \end{cases} \quad (1)$$

$$F(\tau) = \frac{V(\tau)}{V(m)} \quad (2)$$

其中  $m$  为最大多径延时 (maximum excess delay), 延时大于  $m$  的多径分量的强度足够小而可以忽略. 将上式微分后即得到多径分量分布的概率密度函数 (PDF). 结合信号传播的路径损耗, 就可以得到接收功率的延时分布曲线 (power delay profile), 从而估算信道的多径参量.

虽然上述模型提供了一个相当简便的方法来预测多径信道特性, 它的计算结果却与实际情况有很大偏差. 从文献 [3] 给出的多径延时分布结果来看, 其累计概率分布曲线为明显的凹曲线, 也就是说, 单反射分量的存在概率将随着延时的增加而增加, 如图 2 虚线所示. 尽管延时大的分量所经历的路径损耗更加严重, 即使引入路径损耗因素, 根据此模型所预测的接收信号强度仍然会在相当长的延时范围 (大于 10us) 内保持增加, 而有关卫星信道的实测与仿真数据说明, 所接收多径分量的信号强度在 1us 的延时之内就可以下降到可以忽略的程度. 反观二维 GBSB 模型所得到的多径分量概率密度曲线, 则在同样的延时范围内呈单调递减的特征, 从而实现了对信道特性的近似描述. 可以认为, 椭球模型结论的偏差是因为

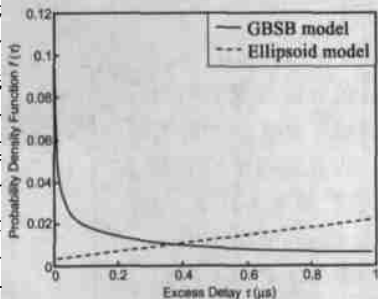


图 2 GBSB 模型和椭球模型多径分量概率密度函数的比较

单纯的一次反射路径均匀分布的假设已经不再适合平流层的信道环境. 因此, 为了将单反射原理更切合实际的应用于平流层信道的预测, 我们需要对在平流层环境中单反射路径存在的条件进行进一步的限定.

### 3 多建筑物阻挡概率模型

可以想象, 由于地形和地面物体的阻挡影响, 即使反射点在空间中均匀分布, 所经过这些反射点的单反射分量也无法全部到达接收点. 也就是说, 对单反射分量的数量与  $V(\cdot)$  成正比关系的假设在平流层信道环境中已经不可接受, 我们有必要引入一个参数对空间中不同位置的单反射路径的存在概率加以描述. 虽然这种阻挡的影响完全取决于实际环境, 但是在缺少有效的地表特征数据的情况下, 我们仍然可以通过建立一个简化的阻挡模型来大致描述这个特性.

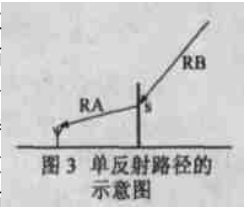


图 3 单反射路径的示意图

从图 3 可见, 一条单反射路径是否存在主要有三个决定因素:

- (1) 在反射点和接收点之间存在直达路径的概率  $P_{RA}$ ;
- (2) 在发射点和反射点之间存在直达路径的概率  $P_{RB}$ ;
- (3) 反射点存在的概率  $P_S$ .

如果假设三者相互独立, 那么此单反射路径存在的概率就可以表示成为  $P_{sb} = P_{RA} P_S P_{RB}$  (3)

为了求解  $P_{RA}$ , 我们假设这是在一个的城市环境, 对信号传播的阻挡主要来自于其中的建筑物, 因此, 在文献 [6] 多衍射模型的基础上, 我们建立了一个多建筑物阻挡模型, 如图

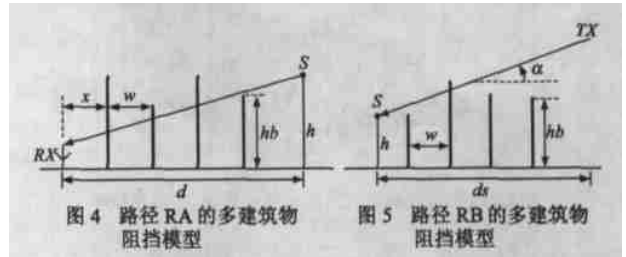


图 4 路径 RA 的多建筑物阻挡模型

图 5 路径 RB 的多建筑物阻挡模型

4 所示. 在此模型中, 假设各建筑之间的间隔相等, 均为  $w$ ; 建筑物的高度服从相同的概率分布  $p_b(h_b)$ . 简单起见, 我们假设  $p_b(h_b)$  服从 Rayleigh 分布 [7]

$$p_b(h_b) = \frac{h_b}{b} \exp\left(-\frac{h_b^2}{2b}\right) \quad (4)$$

如果设接收点 RX 距第一个建筑的距离为  $x$ , 距反射点的距离为  $d$ , 那么位于 RX 和反射点之间的建筑物的数量为

$$N = [1 + (d - x)/w] \quad (5)$$

其中  $[X]$  表示对  $X$  向下取整. 若直达路径 RA 存在, 这些建筑物的高度都要低于式 (6) 所确定的值

$$y_n = (x + w(n - 1))h/d \quad (n = 1, \dots, N) \quad (6)$$

其中  $h$  为反射点的高度. 根据式 (4) 的高度分布, 每个建筑物的高度低于相应的  $y_n$  的概率为

$$P_n = \int_0^{y_n} \frac{h_b}{2} \exp\left[-\frac{h_b^2}{2} \right] dh_b = 1 - \exp\left[-\frac{y_n^2}{2}\right] \quad (n = 1, \dots, N) \quad (7)$$

注意到  $P_n$  是  $x$  的函数,不失一般性,我们假设  $x$  服从  $(0, w)$  内的均匀分布,那么直达路径 RA 的存在概率可以表示为

$$P_{RA} = \frac{1}{w} \int_0^w \prod_{n=1}^N P_n dx \quad (8)$$

在此处,我们忽略了接收点 RX 的高度.

在一个多建筑物的城市环境,我们近似认为反射点主要位于建筑表面,因此可以假设反射点的高度也服从式(4)的概率分布,则可以表示为

$$P_S = \int_h \frac{h_b}{2} \exp\left[-\frac{h_b^2}{2}\right] dh_b = \exp\left[-\frac{h^2}{2}\right] \quad (9)$$

$P_{RB}$  的求解过程与  $P_{RA}$  相似,如图 5 所示,但有两处简化需要说明.在此模型中,设反射点  $S$  与发射点 TX 的距离为  $d_s$ .在平流层系统中,因为 TX 的高度远大于地面物体的高度,对于位于 RX 周围有限范围内的反射点来说,我们可以认为所有直达路径 RB 的入射角度近似相等,均为 LOS 路径的仰角.而且,由于建筑物高度有限,与反射点  $S$  相距过远的障碍物对于路径 RB 的阻挡影响将可以忽略.因此,我们可以将  $d_s$  的取值限定在一定的范围之内(如 500m)以减小计算开销.在上述两步简化的基础上,求解  $P_{RB}$  同样可以利用式(5)~(8),除了将式(6)替换为

$$y_n = \tan(\alpha)(x + w(n-1)) + h \quad (n = 1, \dots, N) \quad (10)$$

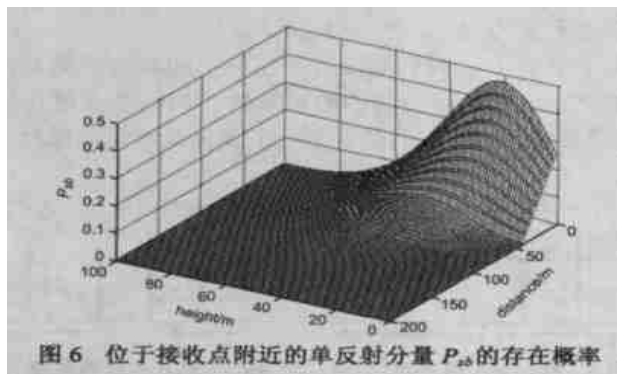


图 6 位于接收点附近的单反射分量  $P_{sb}$  的存在概率

在得到了  $P_{RA}$ 、 $P_S$  和  $P_{RB}$  之后,经过距接收点  $d$ 、高度  $h$  的任一反射点的单反射分量的存在概率  $P_{sb}$  就可以通过式(3)求得.图 6 出示了  $P_{sb}$  的一个典型值,其中  $\alpha = 45^\circ$ ,  $w = 40\text{m}$ ,建筑物平均高度为 35m.

从图中可见,单反射分量最有可能来自于接收点附近的反射点,而非在空间内均匀分布,即分量的数量不再和空间的体积成正比.

如果假设建筑物均匀分布在接收点的附近,能够形成单反射路径的有效反射点的

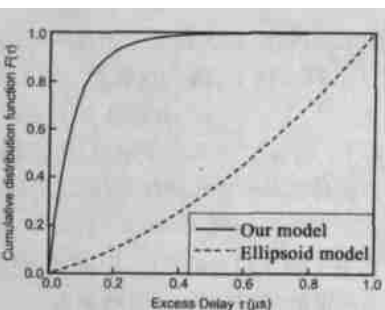


图 7 两种模型多径延时累积概率分布的比较

分布密度将与概率  $P_{sb}$  近似成正比关系.因此,我们只需在公式(2)中引入这个密度因素通过体积分重新计算  $F(\cdot)$ ,就可以得到更合理的多径延时的累积概率分布.因为式(3)不能给出  $P_{sb}$  的显式表示,我们采用了数值方法进行求解.图 7 出示了利用阻挡模型与原椭球模型计算多径延时概率分布的结果比较.从图中可以看出利用阻挡模型所得的累积概率分布曲线为上凸曲线,即多径分量的分布概率随着延时的增加而减少,此变化趋势与实际现象更为符合.

#### 4 信道模型的应用:功率延时分布与时空联合分布的预测

利用阻挡概率信道模型,我们可以更合理的预测平流层多径信道的传播特性.在本文中,我们主要集中于对功率延时分布与时空联合分布特性的讨论.

从上述对密度的积分计算中可以看到,我们只得到了多径分量的相对分布,而没有给出多径分量与直射分量(LOS)之间的能量关系.仅依靠几何模型本身,我们是无法确定多径分量的绝对数量的,因为它直接受到如反射点分布的疏密程度等地表特征的影响,而这个关系并不能利用模型进行限定.同时,影响多径分量能量损耗的因素也比直射分量更加复杂,例如反射表面材质等因素.尽管如此,我们仍然可以利用一些现有的在相似环境下的实测数据来近似确定多径能量的范围.为了便于说明,我们在此定义一个能量密度参数  $\rho$  ( $\text{W}/\text{m}^3$ ),代表单位体积内所接收的多径能量.基于建筑物在接收点周围均匀分布的假设,若不考虑路径损耗因素(将在后面的计算中引入), $\rho$  与  $P_{sb}$  同样成正比关系,可表示为

$$\rho = K_p P_{sb} \quad (11)$$

其中  $K_p$  ( $\text{W}/\text{m}^3$ ) 为常数.根据利用飞行器在仰角  $35^\circ$  的相似环境中的实测结果,文献[8]显示在 500ns 之内多径分量的能量将相对直射分量(LOS)衰减(20~30) dB.对应于本模型接收点位置  $x_0 = 30\text{km}$  的情况,如果设直射分量  $P_{LOS}$  的强度为 1W,  $K_p$  的取值范围为  $[8 \times 10^{-6}, 8 \times 10^{-7}]$ .在确定  $\rho$  后,平流层信道的功率延时分布  $P_D(\cdot)$  就可以通过下式求得.

$$P_D(\cdot) = P_{LOS} P_r(\cdot) \int \rho dv \quad (12)$$

其中 
$$P_r(\cdot) = r^{-n} = \left[1 + \frac{A}{t_0}\right]^{-n} \quad (13)$$

代表了路径损耗,指数  $n$  的取值根据不同的传播环境而定.此处假定收发端均使用全向天线.图 8 为在  $n = 2$  和  $K_p = 4 \times 10^{-6} \text{W}/\text{m}^3$  的条件下对应不同仰角归一化功率延时分布曲线.在数值计算中,曲线的分辨率取

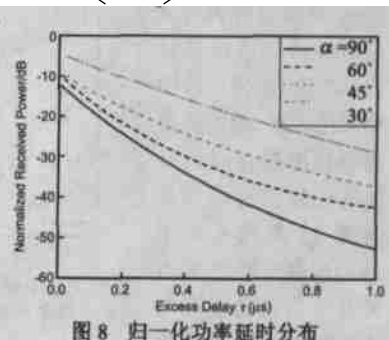


图 8 归一化功率延时分布

10ns.从图中我们可以看到对应于不同的接收仰角,功率延时的分布有很明显的差异,而文献[3]中的椭球模型是无法显示

这种差异的.

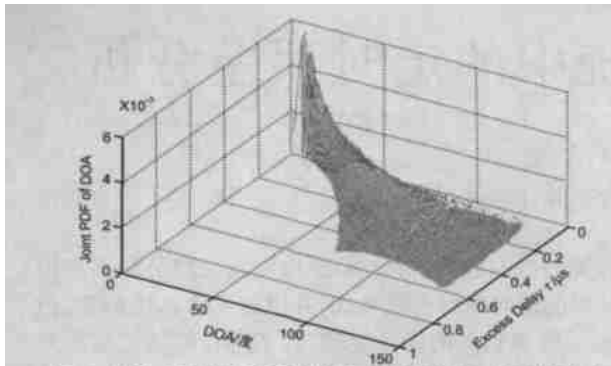


图 9 引入阻挡模型后预测得到的多径分量的时空分布

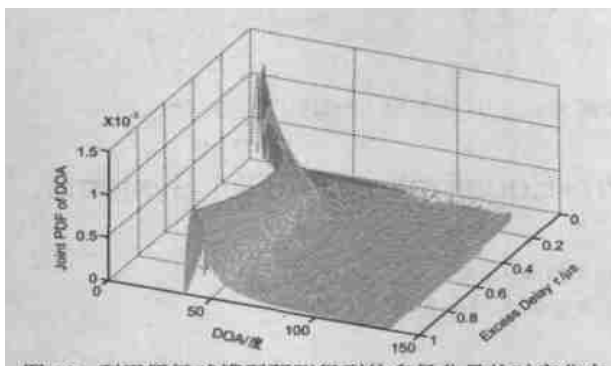


图 10 利用原椭球模型预测得到的多径分量的时空分布

同样,利用阻挡概率模型,平流层信道多径分量的到达角度(DOA: direction-of-arrival)与路径延时之间的关系也可以被预测得到.图9为仰角45°时接收多径分量在延时与入射夹角下的联合概率分布,其中入射夹角定义为多径分量与直射分量之间的夹角.显然,随着传播延时的增加,多径分量将更多的偏离直达路径的方向,同时到达接收点的数量将明显减少.这与文献[5]利用CISB模型在陆地蜂窝信道中所得出的结论是一致的.而对比利用原椭球模型的预测结果,如图10所示,可以发现,随着延时的增加,多径分量的分布概率不但没有下降的趋势,而且比较稳定的集中在45°的入射夹角附近.这也说明了原模型过高地估计了大延时分量的能量,因而有可能误导平流层地面接收系统的设计.

## 5 总结

在本文中,我们首先分析了一个平流层多径信道模型的缺陷.这种缺陷是由于单反射分量均匀分布的假设与实际环境不符而造成的.因此,我们提出了一个简化的传播阻挡模型,用来描述空间中不同单反射路径的存在概率.通过引入分布密度的概念并经过数值积分,我们得到了更合理的平流层多径延时概率分布.本文还利用实测数据确定了多径分量与直射分量之间的能量关系,从而给出了平流层信道的功率延时分布.最后,我们给出了一个平流层信道多径分量时空联合分布的典型结果,同时也通过与原有信道模型预测结果的比

较,说明了我们的多建筑物阻挡模型对原模型的改进效果.

致谢:本文得到了清华大学龚克教授和杨知行教授的指导与帮助,作者在此表示诚挚的谢意.

## 参考文献:

- [1] Z Niu, et al, A demonstration of broadband integrated information systems based on the High Altitude Platform system in China, WPMC '01, Aalborg, Denmark, Sept. 2001.
- [2] G M Djuknic, et al, Establishing Wireless Communications Services via High-Altitude Aeronautical Platforms: A Concept Whose Time Has Come? IEEE Communication Magazine, 1997, 35(9): 128 - 135.
- [3] F Dovis, R Fantini, M Mondin, P Savi. 4G communications based on high altitude stratospheric platforms: channel modeling and performance evaluation, IEEE Globecom01, San Antonio, USA, 2001, 1: 557 - 561.
- [4] M Dottling, et al. A versatile propagation channel simulator for land mobile satellite applications, 48th IEEE Vehicular Technology Conference, 1998, 1: 213 - 217.
- [5] J C Liberti, T S Rappaport. A geometrically based model for line-of-sight multipath radio channels, 46th IEEE Vehicular Technology Conference, 1996, 844 - 848.
- [6] J Walfisch, H L Bertoni. A theoretical model of UHF propagation in urban environments, IEEE Trans Antennas Propag. 1988, 1788 - 1796.
- [7] S R Saunders, B G Evans. A Physical-Statistical Model for Land Mobile Satellite Propagation in Built-up Areas, IEE 10th Int. Conf. Antennas and Propagation, 1997, 2: 44 - 47.
- [8] A Jahn, et al. Narrow and wideband channel characterisation for land mobile satellite systems: experimental results and L-band, Proc Fourth Int Mobile Satellite Conference, 1995.

## 作者简介:

牛志升 男,1964年出生于河北省卢龙县,1985年毕业于北方交通大学通信与控制系,1986年国家公派赴日留学,于1989年和1992年分别获日本丰桥技术科学大学工学硕士和工学博士学位,1992-1994年就职于日本富士通研究所,1994年回清华大学电子工程系任教至今,1999年晋升教授.牛志升教授的主要研究方向包括:(1)宽带通信网络及其流量控制技术;(2)无线IP与无线ATM技术;(3)宽带无线接入及其资源优化管理技术;(4)移动因特网技术;以及(5)平流层通信技术.

刘嵩 男,1978年出生于北京市,2000年和2003年分别于清华大学电子工程系获得工学学士和硕士学位,于2003年7月赴美国Rutgers大学WINLAB实验室攻读博士学位.主要研究方向:平流层通信技术,无线局域网中的服务质量控制技术.

吴佑寿 男,1925年出生于泰国,1946-1948年就读于昆明国立西南联合大学,1948年毕业于清华大学电机系,获工学学士学位,其后留校工作.现任清华大学电子工程系教授,中国工程院院士,全国学位与研究生教育发展中心主任,西南科技大学名誉校长.