

# 一种适用于非城市区域的卫星移动信道统计模型

肖 琨, 吴诗其

(电子科技大学信息所, 四川成都 610054)

**摘 要:** 本文提出了一种适用于非城市区域的卫星移动信道统计模型—莱斯-K模型, 采用K分布来描述由于遮蔽引起的接收信号包络的缓慢变化, 用莱斯分布来描述包含直视信号分量(主径)在内的多径快衰落, 得到了接收信号包络的概率分布和误比特率. 在此基础上, 本文利用样本矩对莱斯-K模型参数进行了估计并对参数估计性能进行了评价. 最后, 本文利用实测数据对模型进行了验证.

**关键词:** 莱斯-K模型; K分布; 归一化矩

**中图分类号:** TN927.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 07-0999-04

## A Statistical Mobile Satellite Channel Model for Non-urban Areas

XIAO Kun, WU Shi-qi

(Information Institution of UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract:** This paper presents Rice-K model which is statistical for a land mobile satellite link in non-urban areas. This model assumes that the slow changes on the received signal envelope are K-distributed due to the shadowing and the multi-path fading including the line of sight path component is Rician distributed. On this basis, the expressions of cumulative density probability function (c. d. f) and the bit error probability of the received signal envelope are derived. Furthermore, the parameters of Rice-K model are estimated by means of moment method in which sample moments and normalised sample moments are used. Also, performance of this kind of parameter estimation is studied. Finally, Rice-K model is validated through the comparison between measured data and the analytical curve given by Rice-K model.

**Key words:** Rice-K model; K distribution; normalized moments

### 1 引言

在卫星移动信道的研究中, 卫星移动信道统计模型与实际移动信道特性的吻合程度是一个至关重要的问题. LOO<sup>[1]</sup>提出了一种适用于乡村地区环境(即大部分时间存在直视信号分量)的卫星移动信道统计模型, 模型假定接收信号由遮蔽条件下的直视信号分量和多径分量组成, 遮蔽条件下的直视信号分量幅度服从对数正态分布, 多径效应服从瑞利分布. Lutz<sup>[2]</sup>提出的陆地移动卫星信道统计模型将传播链路考虑为两种状态: 遮蔽和非遮蔽. 非遮蔽状态环境中的接收信号包络的统计特性是莱斯分布的, 而在遮蔽状态环境下的接收信号包络的统计特性呈瑞利-对数正态分布. 事实上, 文献[1]中的多径不包含直视信号分量, 如果考虑直视信号分量的话, 多径效应是莱斯分布的; 文献[2]中之所以认为遮蔽状态环境下的接收信号包络的统计特性呈瑞利-对数正态分布, 也是认为遮蔽状态环境下不存在直视信号分量. 因此文献[1, 2]中的模型实质上仍然是莱斯-对数正态模型.

本文提出一种适用于非城市区域的卫星移动信道统计模型—莱斯-K模型, 在以下两个方面做了工作.

第一, 提出用K分布来描述非城市区域遮蔽引起的星地链路接收信号包络的缓慢变化, 而不是采用传统的对数正态分布. Jakeman<sup>[4, 5]</sup>通过大量实验证实K分布在描述具有上述特征的复合散射体的散射特性上有较大的优越性, 同时从理论上论证了K分布有良好的解析特性. K分布不仅从宏观上很好地刻划了非城市区域地形的复合本质, 而且从微观上反映了地形散射过程引起的信号起伏.

第二, 本文提出了利用样本矩以及归一化样本矩实时动态地进行模型参数估计的解析方法, 并对参数估计性能进行了解析评价. 在卫星和地面传播链路中, 由于卫星和用户同时在不停地运动, 因此无线传播环境是时变的, 不同的地理区域、不同的自然条件形成了各种各样的无线传播环境. 传统的模型参数估计来自于大量实测数据得到的经验公式, 其对模型参数的估计仅仅取决于仰角, 有一定的局限性.

利用文献[1]的实测数据对模型进行的验证结果表明, 莱斯-K模型与实际卫星移动信道特性吻合得很好.

### 2 莱斯-K模型

定义  $X_1$  和  $X_2$  为独立高斯随机变量, 均值为  $m_i$  ( $i = 1,$

2), 方差都为  $\sigma^2$ . 于是,  $Y^2 = X_1^2 + X_2^2$  为非中心  $\chi^2$  分布, 非中心参数  $S = m_1^2 + m_2^2$ . 定义莱斯随机变量  $R = \sqrt{Y}$ , 且令  $\sigma^2 = 1/2 \cdot (K+1)$ ,  $S = K/(K+1)$  可以得到莱斯分布<sup>[6]</sup>:

$$P_R(R) = 2(K+1) R \exp\left(-\frac{K}{2} R^2 - K\right) I_0\left(\frac{R}{2} \sqrt{K(K+1)}\right) \quad (1)$$

其中  $K$  为莱斯因子,  $I_0(\cdot)$  为零阶第一类改进型贝塞尔函数.  $K$ -分布<sup>[4]</sup>的表达式为:

$$P_S(S) = \frac{2b}{(a)} \left(\frac{bS}{2}\right)^a K_{a-1}(bS) \quad a > 0 \quad (2)$$

其中  $b = 2(a/\langle S^2 \rangle)^{1/2}$ ,  $K_\nu(\cdot)$  为  $\nu$  阶第二类改进型贝塞尔函数.

在本文所描述的卫星移动通信统计模型中, 接收信号包络  $r$  为两个独立随机变量的乘积, 即  $r = R \cdot S$ , 其中  $R$  代表包含直视信号分量在内的接收信号包络的多径快衰落, 呈现莱斯分布,  $S$  代表由于遮蔽引起的接收信号包络的缓慢变化, 是服从  $K$ -分布的, 由  $R$  和  $S$  相互独立得:

$$\begin{aligned} P_r(r) &= \int_0^{\frac{r}{S}} P_R\left(\frac{r}{S}\right) P_S(S) dS = \int_0^{\frac{r}{R}} P_S\left(\frac{r}{R}\right) P_R(R) dR \\ &= \frac{(K+1)b^{-K}r^{a+1}}{2^{a-2}(a)} \int_0^{\frac{r}{R}} e^{-(K+1)R^2} \left(\frac{r}{R}\right)^a I_0\left(\frac{r}{R} \sqrt{K(K+1)}\right) K_{a-1}\left(\frac{br}{R}\right) dR \end{aligned} \quad (3)$$

于是接收信号包络的累积概率分布为:

$$\begin{aligned} P_r(r_0) &= \int_0^{r_0} P_r(r) dr = \int_0^{r_0} \int_0^{\frac{r}{R}} P_R(R) P_S\left(\frac{r}{R}\right) dR dr \\ &= \frac{(K+1)e^{-K}r_0^{a+1}}{2^{a-2}(a)} \int_0^{r_0} e^{-(K+1)R^2} \left(\frac{r}{R}\right)^a I_0\left(\frac{r}{R} \sqrt{K(K+1)}\right) K_{a-1}\left(\frac{br}{R}\right) dR dr \end{aligned} \quad (4)$$

### 3 误比特率

接收信号的误比特率是由符号能量  $E_s$  和单边噪声功率谱密度  $N_0$  之比决定的,  $E_b$  取决于卫星链路无衰落下的符号能量  $E_{\text{link}}$  和一个符号持续期间的遮蔽和衰落量. 对于一定的比特速率和实际移动速度来说, 衰落与比特速率相比是缓慢变化的, 所以在一个符号持续期间内, 接收信号可认为是恒定的. 如果采用 DPSK<sup>[2]</sup>, 误比特率为

$$P_e(r) = \frac{1}{2} e^{-rE_{\text{link}}/N_0} \quad (5)$$

于是, 误比特率均值为

$$\begin{aligned} P_e &= \int_0^{\infty} P_e(r) p_r(r) dr = \int_0^{\infty} \int_0^{\frac{r}{R}} P_R(R) P_S\left(\frac{r}{R}\right) dR dr \\ &= \frac{(K+1)e^{-K}r_0^{a+1}}{2^{a-1}(a)} \int_0^{\infty} e^{-rE_{\text{link}}/N_0 - (K+1)R^2} \left(\frac{r}{R}\right)^a I_0\left(\frac{r}{R} \sqrt{K(K+1)}\right) K_{a-1}\left(\frac{br}{R}\right) dR dr \end{aligned} \quad (6)$$

### 4 莱斯-K模型参数估计

卫星移动通信统计模型参数的估计在传统上常采用经验公式来进行, 因此所估计出来的值不是十分精确的, 而且其估计性能也难以量化的进行评价. 本文采用统计的方法, 利用接收信号包络的样本矩和归一化样本矩来进行莱斯-K模型参

数的估计. 莱斯分布的  $n$  阶矩和  $K$ -分布的偶数阶矩及归一化  $n$  阶矩分别为:

$$E(R^n) = (K+1)^{-n/2} e^{-K} \left(1 + \frac{n}{2}\right) {}_1F_1\left(1 + \frac{n}{2}; 1; K\right) \quad (7)$$

$$E(S^{2n}) = \left(\frac{2}{b}\right)^{2n} \frac{n!}{(a)} \frac{(n+a)}{(a)} \quad (8)$$

$$\frac{E(S^{2n})}{E^n(S)} = \frac{n!}{a^n} \frac{(n+a)}{(a)} \quad (9)$$

其中:  $(\cdot)$  和  ${}_1F_1(\cdot)$  分别为伽马函数和合流超几何函数. 由于  $R$  和  $S$  的相互独立性可以得到接收信号包络的偶数阶矩和归一化  $n$  阶矩的表达式:

$$E(r^{2n}) = E(S^{2n}) E(R^{2n}) \quad (10)$$

$$\frac{E(r^{2n})}{E^n(r)} = \frac{E(S^{2n}) E(R^{2n})}{E^n(S) E^n(R)} \quad (11)$$

在莱斯-K模型参数估计中, 令  $r^n$  代表接收信号包络  $r$  的  $n$  阶样本矩,  $\hat{a}$ 、 $\hat{b}$ 、 $\hat{K}$  分别表示莱斯-K模型各参数的估计值, 然后用样本矩来取代式(10)、(11)中的矩, 于是有:

$$\frac{r^2}{(\hat{r})^2} = 2 \frac{e^{\hat{K}} {}_1F_1(2; 1; \hat{K})}{(3/2) {}_1F_1(3/2; 1; \hat{K})} \left(1 + \frac{1}{\hat{a}}\right) \quad (12)$$

$$\frac{r^4}{(\hat{r})^4} = 4 \frac{e^{\hat{K}} {}_1F_1(3; 1; \hat{K})}{{}_1F_1(2; 1; \hat{K})} \left(1 + \frac{1}{\hat{a}}\right) \quad (13)$$

$$r^2 = 4(K+1)^{-1} e^{-K} {}_1F_1(2; 1; K) \frac{\hat{a}}{\hat{b}^2} \quad (14)$$

联立式(12)、(13)得到:

$$C_1 {}_1F_1(3/2; 1; \hat{K}) {}_1F_1(3; 1; \hat{K}) - C_2 {}_1F_1^3(2; 1; \hat{K}) = 0 \quad (15)$$

其中  $C_1 = \frac{2(3/2)}{2} \frac{r^2}{\hat{r}^2}$ ;  $C_2 = \frac{1}{4} \frac{r^4}{(\hat{r}^2)^2}$

从式(15)通过数值方法可以计算出莱斯因子  $K$  的值, 将该值代入式(12)计算出参数  $\hat{a}$  的值, 再将  $K$ 、 $\hat{a}$  值代入式(14)计算出参数  $\hat{b}$  的值.

### 5 莱斯-K模型参数估计的性能分析

在第4节中, 利用接收信号样本, 通过矩的方法对莱斯-K模型参数进行了估计; 显然, 估计所得的模型参数必然存在偏差, 有必要对偏差性能进行评价. 令  $n^{(2)} = E(r^2)/E^2(r)$ ,  $n^{(4)} = E(r^4)/E^2(r^2)$ ,  $n^{(2)}$  和  $n^{(4)}$  分别代表  $n^{(2)}$  和  $n^{(4)}$  的偏差, 于是:

$$n^{(2)} = \frac{r^2}{(\hat{r})^2} - \frac{\langle r^2 \rangle}{\langle r \rangle^2}; \quad n^{(4)} = \frac{r^4}{(\hat{r}^2)^2} - \frac{\langle r^4 \rangle}{\langle r^2 \rangle^2} \quad (16)$$

式中“ $\cdot$ ”和“ $\langle \cdot \rangle$ ”分别表示偏差和均值. 利用微扰法, 经过繁杂的计算, 保留至  $N^{-1}$  项, 于是:

$$n^{(2)} = \frac{1}{N} \left[ \frac{\langle r^2 \rangle}{\langle r \rangle^2} + 2 \frac{\langle r^3 \rangle}{\langle r \rangle^3} - 3 \frac{\langle r^2 \rangle}{\langle r \rangle^2} \right] \quad (17)$$

$$n^{(4)} = \frac{1}{N} \left[ \frac{\langle r^4 \rangle}{\langle r^2 \rangle^2} + 2 \frac{\langle r^6 \rangle}{\langle r^2 \rangle^3} - 3 \frac{\langle r^4 \rangle}{\langle r^2 \rangle^2} \right] \quad (18)$$

在式(12)和(15)中应用微扰法得:

$$K = \frac{A_{11} n^{(4)} - A_{12} n^{(2)}}{A_{21} - A_{22}} \quad (19)$$

$$a = \frac{B_{11} n^{(2)} - B_{12} K}{B_{21} - B_{22}} \quad (20)$$

其中:

$$A_{11} = \frac{1}{4} {}_1F_1(2; 1; K); A_{12} = \frac{1}{2} {}_2(3/2)_1 F_1(3/2; 1; K) {}_1 F_1(3; 1; K);$$

$$A_{21} = \frac{3}{2} {}_2(3/2)_1 F_1(3/2; 1; K) [ {}_1 F_1(3/2; 1; K) {}_1 F_1(4; 2; K) + {}_1 F_1(5/2; 2; K) {}_1 F_1(3; 1; K) ] n^{(2)}$$

$$A_{22} = \frac{3}{2} {}_1 F_1(2; 1; K) {}_1 F_1(3; 2; K) n^{(4)};$$

$$B_{11} = a^2 (3/2)_1 F_1(3/2; 1; K);$$

$$B_{12} = 2(a+1)e^K {}_1 F_1(2; 1; K) + 2 {}_1 F_1(3; 2; K) - 3a^2 (3/2)_1 F_1(3/2; 1; K) {}_1 F_1(5/2; 2; K) n^{(2)};$$

$$B_{21} = 2e^K {}_1 F_1(2; 1; K); B_{22} = {}_2(3/2)_1 F_1(3/2; 1; K) n^{(2)};$$

$N$  是样本数. 可以看出, 当  $N$  增大时, 样本矩偏差均值减小; 当  $N \rightarrow \infty, n^{(2)} \rightarrow 0, n^{(4)} \rightarrow 0$ . 最后, 模型参数  $b$  的偏差均值可以从式 (14) 得到:

$$b = \frac{C_1 a - C_2 K}{C_3} \quad (21)$$

其中:  $C_1 = 4 {}_1 F_1(2; 1; K); C_2 = b^2 (K+2)e^K < r^2 > - 8 a {}_1 F_1(3; 2; K); C_3 = 2b (K+1)e^K < r^2 >;$

对模型参数的偏差性能分析之后, 下面对估计方差进行计算. 模型参数  $K$  的方差

$$\begin{aligned} \sigma_K^2 &= (K)^2 - K^2 \\ &= \frac{A_{11} (n^{(4)})^2 + A_{12} (n^{(2)})^2 - 2A_{11}A_{12} n^{(4)} n^{(2)}}{(A_{21} - A_{22})^2} - K^2 \end{aligned} \quad (22)$$

同理求出模型参数  $a$  和  $b$  的估计方差分别为:

$$\begin{aligned} \sigma_a^2 &= \frac{1}{(B_{21} - B_{22})^2 (A_{21} - A_{22})} [ l (A_{21} - A_{22}) B_{11}^2 + 2B_{11}B_{12}A_{12} ] (n^{(2)})^2 \\ &\quad + (A_{21} - A_{22}) B_{12}^2 (K)^2 - 2B_{11}B_{12}A_{11} n^{(4)} n^{(2)} ] - a^2 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\sigma_b^2 = \frac{C_1^2 (a)^2 + C_2^2 (K)^2 - 2C_1 C_2 (a K)}{C_3^2} - b^2 \quad (24)$$

其中:  $(n^{(2)})^2 = \frac{1}{N} \left[ \frac{E(r^4)}{E^4(r)} - 4 \frac{E(r^2) E(r^3)}{E^2(r) E^3(r)} - \left( \frac{E(r^2)}{E^2(r)} \right)^2 + 4 \left( \frac{E(r^2)}{E^2(r)} \right)^3 \right] + (n^{(2)})^2;$

$$(n^{(4)})^2 = \frac{1}{N} \left[ \frac{E(r^8)}{E^4(r^2)} - 4 \frac{E(r^4) E(r^6)}{E^2(r^2) E^3(r^2)} - \left( \frac{E(r^4)}{E^2(r^2)} \right)^2 + 4 \left( \frac{E(r^4)}{E^2(r^2)} \right)^3 \right] + (n^{(4)})^2;$$

$$\begin{aligned} n^{(2)} n^{(4)} &= \frac{1}{N} \left[ \frac{E(r^6)}{E(r^2) E(r^2)^2} + \frac{E(r^2) E(r^4)}{E(r^2) E(r^2)^2} + 2 \frac{E(r^3) E(r^4)}{E(r^3) E(r^2)^2} \right. \\ &\quad \left. + 2 \frac{E(r^2) E(r^6)}{E(r^2)^2 E(r^2)^3} - 3 \left( \frac{E(r^2)}{E(r^2)^2} \right)^2 \frac{E(r^4)}{E(r^2)^2} \right. \\ &\quad \left. - 3 \frac{E(r^2)}{E(r^2)^2} \left( \frac{E(r^4)}{E(r^2)^2} \right)^3 \right]. \end{aligned}$$

由于模型参数  $a$  和  $K$  的偏差来自独立的两个随机过程, 因此可以近似认为其偏差也相互独立, 即  $a K = a K$ . 这样, 从以上过程计算出了模型参数估计的偏差均值

和方差.

### 6 模型验证及数值结论

本文利用文献 [1] 提供的实测数据来验证上面提出的适用于非城市区域的卫星移动信道统计模型—莱斯-K 模型. 文献 [1] 提供了三种情形下的实测数据: 非经常轻遮蔽情形 (稀疏树木覆盖)、经常重遮蔽情形 (密集树木覆盖) 以及综合结论 (轻遮蔽和重遮蔽都存在) 情形. 下面把莱斯-K 模型与实测结论进行了拟合, 并与文献 [1] 中的拟合结果进行了比较, 如图 1 所示. 从图 1 可以看出, 拟合曲线和实测结果吻合得很好. 与文献 [1] 中的移动信道统计模型相比, 非经常轻遮蔽情形下, 本文中的莱斯-K 模型在 0~30% 的区间内的拟合程度比文献 [1] 中的模型稍差, 在中间区域的拟合程度差不多; 在 80%~100% 的区间内较文献 [1] 中模型稍好; 经常重遮蔽情形下, 莱斯-K 模型的拟合程度和文献 [1] 中模型差不多, 而在综合结论即轻遮蔽和重遮蔽都存在的情形下莱斯-K 模型的拟合程度与文献 [1] 中模型相比, 前者对实测数据的拟合程度要好得多. 由于在实际卫星移动信道环境中, 非城市区域的地形通常轻遮蔽和重遮蔽都存在, 因此综合结论情形更接近非城市区域实际情况. 因此, 本文提出的适用于非城市区域的莱斯-K 模型拟合性能在总体上优于文献 [1] 中的卫星移动信道统计模型.

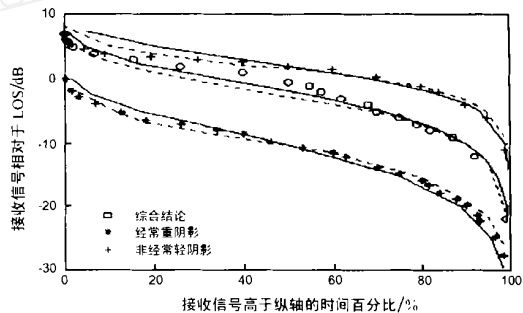


图 1 卫星信道模型理论曲线与实测数据结果拟合图. 实线代表本文所提模型的理论拟合曲线, 点线代表文献 [1] 中模型的理论.

对于 DPSK, 莱斯-K 模型在三种典型传播环境中的均值误比特率如图 2 所示. 从图 2 看出, 在通常遮蔽传播环境中, 莱斯-K 模型的误比特率均值在三种传播环境中是最大的, 这是由于经常的重遮蔽严重影响了无线信号的传播, 需要有一个很高的链路功率来降低误比特率直到误比特率性能可以被接受. 在非经常轻遮蔽传播环境中, 由于遮蔽对信号传播的影响很小, 因此均值误比特率非常低, 只需要较低的链路功率即可得到一个理想的误比特率性能. 在综合传播环境 (重遮蔽和轻遮蔽都存在) 中, 误比特率性能要远优于重遮蔽传播环境, 而比轻遮蔽传播环境稍差, 一个适度的链路功率即可满足误比特率性能要求.

莱斯-K 模型在三种典型传播环境中的估计参数和参数估计性能分别在表 1~3 中给出. 从表 1 可以看出, 随着传播环境的改变, 从轻遮蔽环境到重遮蔽环境, 模型参数  $a$  和  $K$

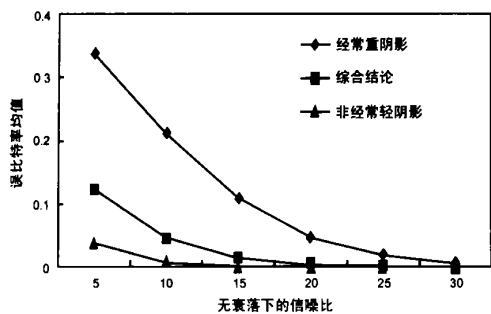


图2 三种情形下误比特率均值与无衰落下信噪比的关系不断减小,而模型参数  $b$  的值不断增大.在表2和表3中,参数估计的均值偏差和方差范围在  $10^{-7} \sim 10^{-4}$  和  $10^{-6} \sim 10^{-3}$  数量级上,达到了足够的精确度.

表1 模型参数

情形	$a$	$b$	$K$
非经常轻阴影	1.1	0.75	4.55
综合结论	0.55	1.0	3.0
经常重阴影	0.37	4.3	1.8

表2 模型参数偏差

情形	$a$	$b$	$K$
非经常轻阴影	1.3257e-05	7.9631e-05	1.8444e-04
经常重阴影	9.1632e-06	2.9250e-07	5.1775e-04
综合结论	9.1707e-06	2.9655e-05	3.2000e-04

表3 模型参数方差

情形	$\frac{2}{a}$	$\frac{2}{b}$	$\frac{2}{K}$
非经常轻阴影	1.4253e-04	7.1e-03	1.99e-03
经常重阴影	3.4205e-05	2.2276e-06	8.78e-03
综合结论	5.0879e-05	8.1689e-04	5.44e-03

## 7 结论

本文提出了一种适用于非城市区域的卫星移动通信道统计模型—莱斯-K模型,研究了该模型接收信号包络的统计分布和误比特性能;在此基础上进一步提出了一种基于矩的参数估计方法并对估计性能进行了分析.模型验证及数值分析结

果表明莱斯-K模型能较好地描述非城市区域的卫星移动通信道特性,在卫星移动通信道研究领域具有一定的理论价值和实际意义.

## 参考文献:

- [1] HUN LOO. A statistical model for a land mobile satellite link [J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 1985, VT-34(3): 122 - 127.
- [2] Erich Lutz, Daniel Cygan, et al. The land mobile satellite communication channel—recordings, statistics, and channel model [J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 1991, 40(2): 375 - 385.
- [3] GARRY C. HESS. Land mobile satellite excess path loss measurement [J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 1980, VT-29(2): 290 - 297.
- [4] E Jakeman. On the statistics of K-distributed noise [J]. J. Phys. A: Math. Gen. 1980, (13): 31 - 48.
- [5] E Jakeman, J E McWhirter, P N Pusey. Enhanced fluctuations in radiation scattered by moving random phase screen [J]. J. Opt. Soc. Am. . 1976, (66): 1175 - 1182.
- [6] J G Proakis. Digital Communications [M]. New York: McGraw Hill, 1983.

## 作者简介:



肖 琨 男,1974年6月出生于湖南省邵阳,1996年、1999年于电子科技大学分别获得工学学士和硕士学位,现正在电子科技大学通信与信息工程学院攻读博士学位,目前主要从事卫星移动通信道、第三代移动通信系统无线资源管理等领域的研究.

吴诗其 男,1938年出生于四川省乐山市,电子科技大学教授、博士生导师、中国通信学会理事,1964年于成都电讯工程学院研究生毕业,近年来从事卫星通信方面的研究工作,发表论文近百篇,著作两部,获部、省级科技进步奖6次.