

混合蜂窝系统中采用信干比功率控制的反向链路容量分析

吴 杰,李建东

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室、信息科学研究所,陕西西安 710071)

摘 要: 在移动通信系统中,信干比作为评估信道质量的标准,可以用于功率控制场合,同时随着小区移动用户的增多,小区的裂化不可避免;两者的结合对信道容量将产生较大影响. 本文将均匀小区的性能分析扩展到混合小区中,给出了利用信干比进行功率控制下混合蜂窝的反向链路容量的一般分析方法,数值计算结果表明,混合蜂窝中采用信干比进行功率控制,可以得到较高的信道容量.

关键词: 链路容量; 功率控制; 信干比

中图分类号: TN929.533 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 04-0506-04

Reverse Link Capacity Analysis for an SIR-Based Power-Controlled CDMA Cellular System with Mixed Cell

WU Jie, LI Jian-dong

(National Key Laboratory of ISN, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: In the mobile communications system, the ratio of signal-to-interference used as a criterion of evaluating the signal quality, is adopted in power control. Also, in heavily populated areas, cell splits are unavoidable to increase the capacity of the cellular system. The reverse link capacity of an SIR-based power controlled cellular system with mixed cell is derived. The analytical results show that the system can increase the link capacity greatly.

Key words: link capacity, power control, signal-to-interference

1 引言

链路容量是 CDMA 蜂窝系统的重要指标,而功率控制是链路容量的关键,目的是控制系统中多址干扰. 文献[1][2]讨论了有功率控制的 CDMA 蜂窝系统的链路容量,文献[3]分析了不同业务下的功率控制算法及错误概率. 这些文献都假定各用户信号等功率(强度)到达本小区基站,因而是以信号强度为基础进行的功率控制.

实际上,信干比(这里信干比指信号与噪声加干扰的和之比)易于测量,且比信号强度更能反映干扰情况. 文献[4]表明以信干比进行功率控制比以信号强度进行功率控制能带来更高的链路容量;文献[5]给出了信干比功率控制的均匀小区在不同流量模型下的性能.

此外,蜂窝系统中蜂窝大小是由流量与用户密度决定,在高用户密度区域,分区不可避免,文献[6]分析了分区后混合蜂窝系统的链路容量,但只给出上限值,并未给出用户数与干扰和信号的关系.

本文讨论了采用信干比进行功率控制的混合蜂窝系统的反向链路容量,给出了符合 IS-95 标准下的系统用户数. 本文从分析均匀小区干扰入手,将分析方法扩展到混合小区中,利用信号与干扰的相互关系求得最大用户数.

2 反向链路容量

2.1 总干扰

若一移动台属于某一小区,则该小区称为此移动台的归属小区(home BS). 通常功率控制是对慢衰落进行控制,对一距离为 r 的用户来讲,路径损耗 $L \propto r^{-\alpha} 10^{\zeta/10}$, 式中 α 为传播常量, ζ 为阴影衰落变量,它为一均值为 $m\zeta$ 、方差 σ^2 的高斯分布变量.

考虑如图 1 编号的均匀分布小区,先讨论 0 小区受干扰情况,一般认为 0 小区受到其外两层小区(小区 1-6, 7-18)的用户干扰,更远小区的干扰可以忽略. 设一用户属于小区 m ,它离基站 m 的距离 r_m ,离基站 0 的距离 r_0 ,设基站 m 接收到该用户功率为 S ,则该用户对 0 小区的干扰为

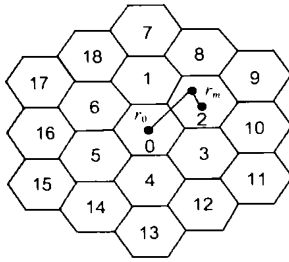


图 1 均匀小区模型

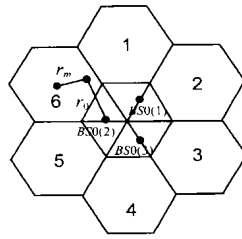


图 2 0 小区裂化

$$I = S \left(\frac{r_m}{10^{\zeta_0/10}} \right) \left(\frac{10^{\zeta_0/10}}{r_0} \right) = S \left(\frac{r_m}{r_0} \right)^u 10^{(\zeta_0 - \zeta_m)/10} \quad (1)$$

式中 ζ_0 与 ζ_m 是相互独立的同分布高斯变量,两者之差 $\zeta = \zeta_0 - \zeta_m$ 为零均值方差 $2\sigma^2$ 的高斯变量.均匀小区中若以信号强度进行功率控制,则基站接收到本小区内每个用户信号功率 S 是相同的,与激活用户数及干扰无关;且每个基站 (0 - 18) 希望接收到的信号功率相同,也为 S . 设小区的用户密度为 ρ ,由文献[2]所有外部小区 (小区 1 - 18) 的用户总干扰可以表达为

$$I_0 = \iint_{A} \left(\frac{r_m}{r_0} \right)^u 10^{(\zeta_0 - \zeta_m)/10} \Psi_a \left(\zeta_0 - \zeta_m, \frac{r_m}{r_0} \right) \rho dA \quad (2)$$

其中 A 为小区 1 - 18 的面积, ρ 为激活用户的密度,而

$$\Psi_a \left(\zeta_0 - \zeta_m, \frac{r_m}{r_0} \right) = \Psi_a \left(\zeta, \frac{r_m}{r_0} \right) = \begin{cases} 1, & \text{if } \left(\frac{r_m}{r_0} \right)^u 10^{\zeta/10} \leq 1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

上式保证在均匀小区下一个移动用户属于小区 m 而不是小区 0,为方便计算,使用距离最近来确定用户归属,即用户离哪个基站更近,就属于那个小区.若用户到各小区基站 k 的距离为 r_k ,如果 $r_m = \min r_k$,则用户属于小区 m .

小区裂化后的非均匀小区如图 2,小区 0 分成三个:为 $0_{(1-3)}$.此时有三类小区:即内层 ($0_{(1-3)}$)、中层 (2 - 6) 与外层 (7 - 18),对应的用户数也不相同,设 N_{mi} 、 N_{ma} 与 N_c 分别为内层一个小区用户数、中层一个小区用户数与外层一个小区用户数.此时某一小区内所有用户到达其基站的信号功率仍然相同,同层基站收到的每个用户功率也相同,不同层小区基站收到的功率则不同.由于裂化后有三层,故共有三个希望接收功率值:内层基站为 S_{micro} 、中层基站为 S_{macro} 与外层基站的 S .若以信干比进行功率控制,信号与干扰比最后会收敛于一个常值,故三个希望接收功率会对应三个总干扰.由于同类小区情况相同,故只研究 $BS0_{(1)}$ 、 $BS1$ 与 $BS7$,受到其它小区用户的总干扰记为 I_{01} 、 I_1 与 I_7 .因为中层三小区对外层基站的干扰可以近似等效为一个未分割小区的干扰,所以对最外层小区可以忽略小区裂化的影响,即认为 S 和 I_7 与均匀小区时情况相同.

信干比进行功率控制的方法为:设基站最大接收功率为 h_{max} ,接收功率为 $[0, h_{max}]$ 间一个随机量,如果用户发功率达最大仍能满足所需的信干比,则该用户发功率置零.

混合小区中,在均匀小区中确定移动台归属的式 (3) 不再成立,此时移动台归属由导频 (pilot) 信号确定,不同小区基站

发送强度不同的导频信号,但设计小区时在两小区交界处移动台从两个基站的接收功率相等,设基站 j 与 i 发送的导频信号功率为 P_j 、 P_i ,若两小区的传播路径的阴影衰落均值相同约去该项,只考虑距离影响有

$$P_j / R_j^u = P_i / R_i^u \Rightarrow P_i = \left(\frac{R_i}{R_j} \right)^u P_j \quad (4)$$

其中 R_j 、 R_i 为小区的半径.则为保证移动台属于小区 m 而不是小区 0,有

$$\Psi = f \left(\zeta_m - \zeta_0, \frac{r_m}{r_0} \right) = \begin{cases} 1 & \zeta_m - \zeta_0 \leq 10 \log_{10} \left(\frac{R_i r_m}{R_j r_0} \right) \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

可见 Ψ 值为小区半径等的函数,简称为 $\Psi(R_i, R_j)$, R_i 与 R_j 分别为所研究小区与其它小区的半径,若两者半径相同,则 Ψ 值简化为式 (3).

另一方面,各小区容纳用户数不同,系统不同统一用密度 ρ 来表示.为此定义 α 为语音激活因子,若一小区内有用户 N 个,那么干扰用户数共有 αN 个,式 (2) 的积分为 $BS2-18$ 内所有激活用户对 0 小区的干扰,总干扰为

$$I_0 = \sum_{j=1, j \neq i}^M \sum_{k=1}^{N_j} \alpha_{k, BSj} I_{k, BSj} (r_i, r_j) \Psi(R_i, R_j) \quad (6)$$

式中: M 为小区数目; N_j 为对应小区内用户数; $\alpha_{k, BSj}$ 为不同小区的激活因子; $I_{k, BSj} (r_i, r_j)$ 为 j 小区用户 k 对所研究小区 (如 $BS0_{(0)}$) 的干扰,该用户距其归属小区距离为 r_j ,距所研究小区距离为 r_i .

在理想功率控制下,对 $BS0_{(0)}$ 外部总干扰可写成:

$$I_{01} = \sum_{j=7}^{18} \sum_{i=1}^{N_c} \alpha_{i, BSj} I_{i, BSj} (r_0, r_m) \Psi(R_{01}, R_1) + \sum_{j=2}^6 \sum_{i=1}^{N_{macro}} \alpha_{i, BSj} I_{i, BSj} (r_0, r_m) \Psi(R_{01}, R_1) + \sum_{k=2}^3 \sum_{i=1}^{N_{micro}} \alpha_{i, BS0_{(k)}} I_{i, BS0_{(k)}} (r_0, r_m) \Psi(R_{01}, R_{01}) \quad (7)$$

而对 $BS1$ 可得

$$I_1 = \sum_{j=7}^{18} \sum_{i=1}^{N_c} \alpha_{i, BSj} I_{i, BSj} (r_0, r_m) \Psi(R_1, R_1) + \sum_{j=2}^6 \sum_{i=1}^{N_{macro}} \alpha_{i, BSj} I_{i, BSj} (r_0, r_m) \Psi(R_1, R_{01}) + \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^{N_{micro}} \alpha_{i, BS0_{(k)}} I_{i, BS0_{(k)}} (r_0, r_m) \Psi(R_{01}, R_{01}) \quad (8)$$

对 $BS7$,由于已假设与均匀小区下相同

$$I_7 = \sum_{j=7}^{18} \sum_{i=1}^{N_c} \alpha_{i, BSj} I_{i, BSj} (r_0, r_m) \Psi(R_1, R_1) + \sum_{j=2}^6 \sum_{i=1}^{N_{macro}} \alpha_{i, BSj} I_{i, BSj} (r_0, r_m) \Psi(R_1, R_1) \quad (9)$$

因为所受到的干扰是多个用户干扰的线性和,这些干扰是独立同分布的,因而 I_{01} 、 I_1 、 I_7 是高斯分布,有它们的均值与方差即可.三个值的求解过程类似,以 $BS0_{(1)}$ 情况为例,设分区后的小区半径为 R_{01} ,其它小区半径为 R_1 ,由式 (7) 有

$$E[I_{01}] = \sum_{j=1}^{18} \sum_{i=1}^{N_c} E[\alpha_{i,BSj}] E[S](r_m/r_0)^u E[10^{(\zeta_j - \zeta_l)/10}] \cdot \Psi(R_{01}, R_1) + \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^{N_{macro}} E[\alpha_{i,BSj}] E[S_{macro}](r_m/r_0)^u \cdot E[10^{(\zeta_j - \zeta_l)/10}] \Psi(R_{01}, R_1) + \sum_{k=2}^3 \sum_{i=1}^{N_{micro}} E[\alpha_{i,BS0(k)}] \cdot E[S_{macro}](r_m/r_0)^u E[10^{(\zeta_j - \zeta_l)/10}] \Psi(R_{01}, R_{01}) \quad (10)$$

设所有小区语音激活系数相同, $E(\alpha_{i,BSj}) = \alpha$, $\zeta_j - \zeta_l$ 均值为 0, 方差为 $2\sigma^2$ 的高斯变量, 若令 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{-\infty}^x e^{-y^2/2} dy$, 得到的 $E[I_{01}]$ 、 $\text{var}[I_{01}]$ 分别为

$$E(I_{01}) = \sum_{j=1}^{18} \sum_{i=1}^{N_c} M(R_{01}, R_1) E(S) + \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^{N_{macro}} M(R_{01}, R_1) \cdot E(S_{macro}) + \sum_{k=2}^3 \sum_{i=1}^{N_{micro}} M(R_{01}, R_{01}) E(S_{micro}) \quad (11)$$

$$\text{var}(I_{01}) = \sum_{j=1}^{18} \sum_{i=1}^{N_c} (A(R_{01}, R_1) E(S^2) - B(R_{01}, R_1) E^2(S)) + \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^{N_{macro}} (A(R_{01}, R_{01}) E(S_{macro}^2) - B(R_{01}, R_{01}) \cdot E^2(S_{macro})) + \sum_{k=2}^3 \sum_{i=1}^{N_{micro}} (A(R_{01}, R_{01}) E(S_{micro}^2) - B(R_{01}, R_{01}) E^2(S_{micro})) \quad (12)$$

式中:

$$M(R_i, R_j) = \alpha e^{(\alpha_n(10)/10)^2} \left(\frac{r_m}{r_0}\right)^u Q\left(\frac{10u}{\sqrt{2}\sigma} \log_{10}\left(\frac{R_i R_m}{R_j R_0}\right) - \sqrt{2}\sigma \frac{\ln 10}{10}\right);$$

$$A(R_i, R_j) = \alpha e^{(\alpha_n(10)/10)^2} \left(\frac{r_m}{r_0}\right)^{2u} Q\left(\frac{10u}{\sqrt{2}\sigma} \log_{10}\left(\frac{R_i R_m}{R_j R_0}\right) - \sqrt{2}\sigma \frac{\ln 10}{5}\right);$$

$$B(R_i, R_j) = \alpha^2 e^{2(\alpha_n(10)/10)^2} \left(\frac{r_m}{r_0}\right)^{2u} Q^2\left(\frac{10u}{\sqrt{2}\sigma} \log_{10}\left(\frac{R_i R_m}{R_j R_0}\right) - \sqrt{2}\sigma \frac{\ln 10}{10}\right).$$

可见干扰的均值与方差与 $E[S]$ 、 $E[S_{micro}]$ 、 $E[S_{macro}]$ 及对应的均方值有关。

2.2 信号均值与均方差

类似的, 先求 S_{micro} , 由文献[3]有 DS-SSMA 蜂窝系统中

$$E_b/I_0 = \frac{S_{micro}/R}{(KS_{micro} + I_{01})/ \frac{3}{2}w + \eta_0} \quad (13)$$

式中: R 为未扩频信号速率; w 为扩频码片速率; η_0 为噪声功率谱密度; I_{01} 为外小区用户总干扰; K 为 N_{mi} 用户中激活用户数, 为 $\sum_{i=1}^{N_{micro}-1} \chi_i$, $\chi_i = \begin{cases} 1 & \text{概率 } \alpha \\ 0 & \text{概率 } 1 - \alpha \end{cases}$ 由于微小区中各用户到达基站的功率相同为 S_{micro} , 为了保证系统的误码率, 设系统的 E_b/I_0 为 γ , 因此有

$$S_{micro} = (I_0 + \frac{3}{2}w\eta_0) / (\frac{3G}{2\gamma} - K) \quad (14)$$

其中 $G = w/R$ 为处理增益, 为表达简便, 令 $S_{micro} = S$, $L = 3G/2\gamma$, $\frac{3}{2}w\eta_0 = W$, I_0 为 Y . 上式简化为 $S = (Y + W) / (L - K)$, 式中已知总干扰 Y 是高斯过程, 设分布为 $f_Y(y)$, W 、 L 都是已

知常值, S 在 K 取特定值 i 时也是高斯过程, S 与 Y 关系为

$$f_{S|K=i}(s) = |L - i| f_Y((L - i)y - W) \quad (15)$$

S 的分布

$$f_S(s) = \sum_{i=0}^{N_{micro}-1} f_{S|K=i}(s) \pi_i \quad (16)$$

其中 π_i 是 K 取特定值 i 的概率, 服从二项分布, 即 $K = \sum_{i=1}^{N_{micro}-1} \chi_i$ 为 i 的分布, 由式(14)~(16)有

$$E[S] = \alpha \int_{-\infty}^{\infty} s f_S(s) ds = \alpha \sum_{i=0}^{N_{micro}-1} \pi_i \left[\frac{u_i}{2|m|} (\text{erf}(A_1) + \text{erf}(B_1)) - \frac{\sigma_i}{\sqrt{2\pi|m|}} (\exp(-B_1^2) - \exp(-A_1^2)) \right] \quad (17)$$

$$E[S^2] = \alpha \sum_{i=0}^{N_{micro}-1} \pi_i \left\{ \frac{1}{m^3} \left(\frac{\sigma_i^2 + u_i^2}{2} [\text{erf}(A_1) + \text{erf}(B_1)] - \frac{(mh_m + u_i)\sigma_i}{\sqrt{2\pi}} \exp(-B_1^2) + \frac{u_i\sigma_i}{\sqrt{2\pi}} \exp(-A_1^2) \right) \right\} \quad (18)$$

其中 $A_1 = u_1/\sqrt{2}\sigma_i$, $B_1 = (mh_m - u_1)/\sqrt{2}\sigma_i$, $m = 38.3088 - i$, μ_i 、 σ_i 为干扰的均值与方差. 可见接收信号功率与干扰是相关的, 用叠代渐进的方法使其收敛于一定值, 该值应是小区用户的函数. 上式给出的是 S_{micro} 与外部干扰 I_{01} 的均值、方差的关系, 其中 I_{01} 是指 $BS_{0(2-3)}$ 与 BS_{1-18} 中用户的干扰和. 同理可得另两种外部干扰 (对应于小区 BS_1 与 BS_7 所受到的 I_1 、 I_7) 的均值、方差, 由于已认为最外层小区与内部小区裂化无关, 因此可根据均匀小区信号与噪声的关系, 先得到外层的信号功率与干扰的均值、方差, 进而得到此类小区所容纳的最大用户 N_c , 然后再根据 S_{micro} 、 S_{macro} 、 I_{01} 与 I_i 的关系, 迭代获得两种不同小区在不同用户数下信号、干扰的均值和方差。

3 计算结果

数值计算采用 CDMA 的 IS-95 标准参数, $W = 1.2288\text{Mcps}$, $R = 9.6\text{Kbps}$, $G = 128$, $\eta_0 = 1.3 \times 10^{-20} \text{W/Hz}$, $h_{\max} = 2 \times 10^{-14} \text{W}$, $\gamma = 7\text{dB}$, $\alpha = 3/8$, $u = 4$, $\sigma = 8\text{dB}$.

迭代方法为: 先给定小区用户数, 再给定初始信号的均值与均方差, 代入式(11)、(12)得到干扰的均值与方差, 将所得值代入式(17)、(18)中得到信号均值与均方差, 相互迭代直到信号与干扰的均值与方差收敛于一个较稳定的值. 变动小区用户数可以得到信号、干扰与用户数的关系, 曲线的最大值即为可容纳的最大用户数。

图 3 为均匀小区信号与干扰的均值和方差. 可见采用信干比功率控制下, 用户的信号与干扰随用户数的增加而增大, 到最大值后反而随着用户数增加而减少, 这是由于部分用户的信干比在增加发射功率仍达不到所期望的值而将发射功率置零的原因. 图中最大用户数为 70, 即 $N_c = 70$, 同时也可以得到信号与干扰的均值和方差。

混合小区信号与干扰的均值、方差为宏小区用户数 N_{ma} 、微小区用户数 N_{mi} 的函数. 考虑宏、微小区的信号与干扰的均值、方差共八个参数, 利用相互迭代, 八个参数与宏小区用户数与微小区用户数的关系为八个三维曲面图, 计算结果证明干扰、信号的均值与方差有相似的起伏特性. 下面给出宏小区

信号均值 M_{sma} 、微小区信号均值 M_{smi} 与 N_{ma} 及 N_{mi} 的关系图。

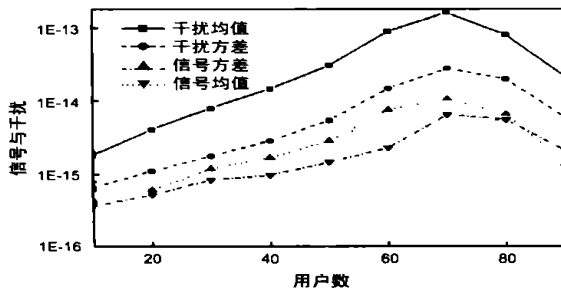


图 3 均匀小区信号与干扰的均值方差

图 4、5 中 z 轴单位为 $10e-14$ 。

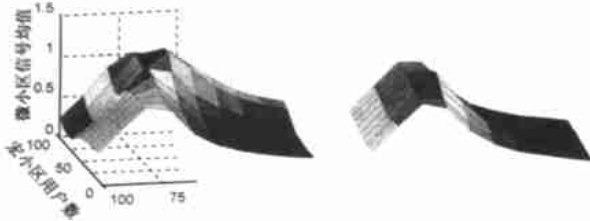


图 4 用户数与微小区的均值 图 5 用户数与宏小区的均值

可见宏小区与微小区都存在一个最大可容纳用户数,对应于图中最高处,且 M_{sma} 与 M_{smi} 开始都随着用户数增加而增大,若用户数再增加,则系统由于干扰增加导致的发射功率为零,从而使干扰、信号均值降低,最大值对应于宏小区用户数为 66,微小区用户数为 58。若定义小区裂化增益为

$$CSG = (M_{macro} \times N_{ma} + M_{micro} \times N_{mi}) / M \times N_c \quad (19)$$

M_{macro} 、 M_{micro} 与 M 为宏小区、微小区与未分区时小区总的个数,分别为 6、3 与 7。代入数值得知裂化增益为 1.33,它反映了小区裂化带来的用户数的增多量。同时可以发现,小区裂化后宏小区的用户数变化不大,这主要是由于信干比控制产生的。可见信干比功率控制比常规系统能带来更大的增益。

4 结论

在移动通信系统中,将信干比作为功率控制的标准可以容纳较大的用户量。本文给出了利用信干比进行功率控制下

混合蜂窝的反向链路容量的一般分析方法。数值计算结果表明,混合蜂窝中采用信干比进行功率控制,比以信号强度进行功率控制可以得到更高的信道容量。

参考文献:

- [1] K S Gilhousen, et al. On the capacity of a cellular CDMA system [J]. IEEE Trans on Vehicular Tech, 1991, 40(5): 303 - 312.
- [2] A Chockalingamm, et al. Performance of closed-loop power control in DS-SSMA cellular systems [J]. IEEE Trans on Vehicular Tech, 1998, 47(8): 774 - 789.
- [3] S J Lee, et al. Capacities of single-code and multi-code DS-SSMA systems accommodating multimedia services [J]. IEEE Trans on Vehicular Tech, 1999, 48(5): 376 - 384.
- [4] Ariyavistakul. SIR-based power control in a CDMA system [J]. IEEE GLOBECOM, 1992, 868 - 873.
- [5] D K Kim, et al. Capacity estimation for an SIR-based power-controlled CDMA system supporting ON-OFF traffic [J]. IEEE Trans on Vehicular Tech, 2000, 49(7): 1094 - 1100.
- [6] Hyoung-Goo Jeon, et al. Reverse link capacity analysis of a CDMA cellular system with mixed cell sizes [J]. IEEE Trans on Vehicular Tech, 2000, 49(11): 2159 - 2163.

作者简介:



吴 杰 男, 1972 年生于山西省永济市, 1996 年获工学硕士学位, 现在西安电子科技大学攻读通信与信息系统博士学位, 主要研究方向为高速调制解调、无线局域网和 CDMA 技术。Email: jwu@pcn.xidian.edu.cn

李建东 男, 1962 年生于江苏阜宁县, 西安电子科技大学教授、博士生导师、通信工程学院院长、中国通信学会会士、中国电子学会高级会员、IEEE 高级会员、第一届第四届 863 个人通信技术专业专家组成员, 主要的研究领域包括个人通信、移动通信、分组无线网、分布式无线网络、软件无线电和移动 IP 等方面。