

三角形蜂窝小区的遍历信息论容量分析

吕星哉 王振 朱近康

(中国科学技术大学个人通信与扩频实验室 合肥 230027)

摘要: 三角形小区通信系统(TCCS)是一种新型分布式基站(BS)通信系统。小区结构为正三角形,分为3个单一覆盖区(UCR)和1个交叉覆盖区(CCR)。移动台(MS)在单一覆盖区内只与邻近的BS通信,在交叉覆盖区内与小区内所有3个基站通信。在该小区结构的基础上,该文提出了在单一覆盖区内采用频率复用,在交叉覆盖区内采用宏分集的频率规划方案。在这种规划方案和每根天线最大发送功率限制下,计算了多小区环境下TCCS在MS单天线和多天线时的遍历容量,与相同条件下的广义分布式天线系统(GDAS)作了比较,结果显示在各种情况下,TCCS的容量相对于GDAS都有显著的增益。

关键词: 无线通信; 三角形小区; 遍历容量; 分布式; 频率规划

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0801-04

Ergodic Information-theoretic Capacity of Triangular Cell

Lü Xing-zai Wang Zhen Zhu Jin-kang

(PCN & SS Lab USTC, Hefei 230027, China)

Abstract: Triangular Cell Communication System (TCCS) is a novel distributed Base Station (BS) system. Its cell structure is an equilateral triangle, and it is composed of 3 Uni-Cover Regions (UCR) and 1 Cross-Covered Region (CCR). Mobile Station (MS) communicates with one near BS in UCR, and communicates with all 3 BSs of the cell in CCR. In this paper, a frequency plan scheme is proposed, which adopts frequency reuse in UCR, and macro diversity in CCR. Under this frequency plan and the per-antenna maximum transmit power constraint, the ergodic capacity of TCCS in multi-cell environment is calculated, and it shows that TCCS offers large capacity gain over Generalized Distributed Antenna System (GDAS).

Key words: Wireless Communication; Triangular cell communication system; Ergodic capacity; Distributed; Frequency plan

1 引言

分布式天线系统(DAS)是近年来研究热点之一。在DAS中,小区内布置若干天线,这些天线通过光纤等高速媒介,和一个中央处理单元相连。DAS通过减少移动台(MS)的接入距离和基站(BS)的发射功率,降低了小区间的共道干扰(Co-Channel Interference, CCI),提供更高的容量和更大的覆盖面积^[1]。多输入多输出(MIMO)则是另外一种采用多天线的技术。它能提高链路的容量和可靠性^[2],是另一研究热点。文献[3]融合了这两种技术提出一种名为广义分布式天线系统的新型系统(GDAS),MS与GDAS小区内的所有天线构成分布式MIMO系统。文献[4,5]中分析了GDAS的容量。

文献[6]中研究了信道衰落对于GDAS的容量的影响,指出了在MS靠近某根天线时,其余远端的天线并不能带来明显增益。文献[7]中提出了一种新型的三角形小区结构(Triangular Cell Communication System, TCCS)。三角形

小区由3个在BS附近的单一覆盖区(Uni-Covered Region, UCR),和1个远离BS的交叉覆盖区(Cross-Covered Region, CCR)构成,在单一覆盖区中,只有一个BS和MS通信,而在交叉覆盖区中,小区内的3个BS同时和MS通信,但发送功率不随BS和MS间的距离而增长,从而降低了小区间的干扰,并有效利用了多天线的增益。

为了适应TCCS的小区结构,有效地提高频谱利用率,在文献[7]的基础上,本文提出了在单一覆盖区内采用频率复用,在交叉覆盖区内采用宏分集的频率规划方案。在不增加任何硬件开销情况下,将这样一个三角形小区内的3个单一覆盖区,和1个交叉覆盖区划分成4个独立的微小区,在3个单一覆盖区内进行频率复用,在交叉覆盖区内采用宏分集。以进一步提高系统的无线资源利用率。

文献[4,5]中分析遍历容量时,没有考虑实际系统中单根天线最大发送功率受限的问题和多小区环境。本文分析了在单根天线最大发送功率受限的假设下,多小区环境下的新型三角形小区的遍历容量。结果表明,在相同的覆盖面积,无线带宽,平均发送功率和同样的天线的条件下,TCCS的容

量约为 GDAS 的 3 倍。

本文其余内容分为以下几个部分：在第 2 中介绍信道模型，TCCS 的小区结构，功率控制方案和频率规划方案，并分析相应的 CCI。在第 3 节分析 MS 有 1 根天线和 3 根天线时 TCCS 的小区容量。在第 4 节中给出仿真结果及分析。最后是结束语。

2 系统模型

2.1 无线信道模型

本文中主要分析小区本身的结构和频率规划方案对容量影响，为了简化问题，只考虑 BS 单天线的情况，而考虑 MS 有多天线以分析不同接收方案下的容量。假设 MS 有 M 根天线，那么第 i 个 BS 到 MS 的无线信道 \mathbf{h}_i 可以表示成：

$$\mathbf{h}_i = [\sqrt{L_i}h_{1,i}, \sqrt{L_i}h_{2,i}, \dots, \sqrt{L_i}h_{M,i}]^H \quad (1)$$

上标 H 表示共轭转置操作， \mathbf{h}_i 是一个 $M \times 1$ 的矢量。在式(1)中， L_i 表示从第 i 个 BS 到 MS 的路径衰落， $L_i = d_i^{-\alpha}$ ， d_i 是第 i 个 BS 到 MS 的距离， α 为路径损耗因子。 $h_{j,i}$ 表示从第 i 个 BS 到 MS 的第 j 根天线的小尺度衰落，所有 $h_{j,i}$ 独立同分布，为一个服从标准复高斯分布的随机变量。本文分析了 $M = 1$ 和 $M = 3$ 时的容量，分别对应采用发送分集和 3×3 分布式 MIMO 系统两种典型情况。在这两种情况下， \mathbf{h}_i 分别是一个标量和一个 3×1 的矢量。

2.2 三角形小区结构

三角形蜂窝小区结构如图 1。整个小区为一个边长为 $2R_1 + R_2$ 的正三角形，可对服务地域进行无缝覆盖。小区内共有 3 个 BS，分别位于三角形的 3 个顶点： A ， B ， C 。每个 BS 用定向角为 60° 的定向天线来覆盖小区，并通过光纤等高速介质连接到一个基站处理中心(BPC)。整个小区由 3 个单一覆盖区和 1 个交叉覆盖区组成。单一覆盖区是图 1 中的灰色部分，交叉覆盖区为图 1 中的白色部分。在单一覆盖区中，MS 只和该单一覆盖区内的 BS 通信，而在交叉覆盖区中，MS 与这个小区内的 3 个 BS 同时通信。

BS 对小区内与其距离为 d_i 的 MS 使用的功率方案为

$$\begin{cases} P_{\text{tx}} = P_0 d_i^\alpha, & 0 \leq d_i \leq R_1 \\ P_{\text{tx}} = P_0 R_1^\alpha, & d_i > R_1 \end{cases} \quad (2)$$

从式(2)中可以看出，在 MS 从单一覆盖区进入交叉覆盖区以后，BS 维持发送功率不变。 P_0 为在 $d_i = R_1$ 处 MS 的平均接收信噪比(SNR)，则 BS 的最大发送功率为

$$P_{\text{tx,MAX}} = P_0 R_1^\alpha \quad (3)$$

MS 在交叉覆盖区可以利用合并来自 3 个 BS 的不同信号，来提高接受质量。为了使 MS 在小区中心合并后的信号强度与单一覆盖区中相等，这里取 $R_1 = 2R_2$ 。

为了直观反映 TCCS 的性能，本文将 TCCS 与 GDAS 做一比较。GDAS 采用文献[4]中的以 MS 与最近 BS 间距离为基准进行功率的方案。即各 BS 的发送功率均为

$$P_{\text{tx}} = P_0 d_{\text{min}}^\alpha \quad (4)$$

d_{min} 为 MS 离最近 BS 的距离。为了公平起见，假设两种结构的硬件设施完全一致，即两种结构有相同的覆盖面积，且每个 BS 配置相同数目的 60° 扇区天线，每根天线有相同的平均发送功率。BS 间距离也相同。

2.3 频率规划和共道干扰

TCCS 的多小区结构如图 2，为了更好地提高频谱利用率，整个系统的无线带宽分为两个不重叠的部分 F1 和 F2，在交叉覆盖区(图 2 中阴影和斜线区域)内使用 F1，而在单一覆盖区(图 2 中白色区域)内使用 F2，二者的通信互不干扰。3 个同一小区的单一覆盖区采用频率复用。在一般复用因子为 1 的系统中，相邻小区边界的 CCI 很大，而在 TCCS 中，交叉覆盖区隔开了单一覆盖区，因此可以在用小区内频率复用提高频谱利用率的基础上降低引入的 CCI。为了表征总频段中的 F1 和 F2 所占比例，本文中引入频谱划分因子 $\beta = B_{F1} / (B_{F1} + B_{F2})$ ，来表示 F1 占总频段的比例。 B_{F1} 和 B_{F2} 分别为 F1 和 F2 的带宽，不失一般性，以下的分析中，设 $B_{F1} + B_{F2} = 1$ 。

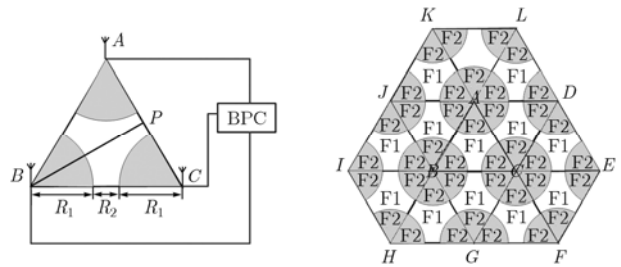


图1 TCCS 小区结构

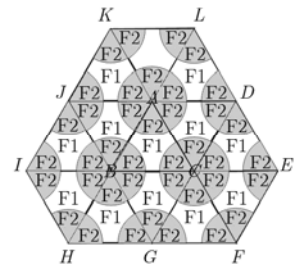


图2 TCCS 小区多小区结构

只考虑小区最外一层的干扰，图 2 中，位于中心的小区受到 BS: D ， E ， F ， G ， H ， I ， J ， K ， L 的干扰。由于采用 60° 定向天线，只有用阴影标示的定向天线才会对中心小区造成干扰。令集合 T 为图 2 中邻小区 BS 的集合， Q 为本小区内 BS 的集合。在交叉覆盖区，MS 的接收信号 \mathbf{Y} 为

$$\mathbf{Y} = \sum_{i \in Q} \mathbf{h}_i X_i + \sum_{k \in T} \mathbf{h}_k X_k + \mathbf{N} \quad (5)$$

式(5)中第 1 项为有用信号，第 2 项为干扰， \mathbf{N} 为高斯白噪声，由于每个邻小区的 BS 对交叉覆盖区的共道干扰为 $P_0 R_1^\alpha$ ，干扰的平均功率为

$$P_{\text{I_cross}} = \sum_{k \in T} P_0 \left(\frac{R_1}{d_k} \right)^\alpha \quad (6)$$

而在第 i 个 BS 的单一覆盖区，有

$$\mathbf{Y} = \mathbf{h}_i X_i + \sum_{k \in Q, k \neq i} \mathbf{h}_k X_k + \sum_{k \in T} \mathbf{h}_k X_k + \mathbf{N} \quad (7)$$

前 3 项分别为有用信号，小区内干扰，和邻小区干扰。假设 MS 均匀分布，BS 对单一覆盖区的平均发送功率为

$$\frac{\int_0^{\frac{\pi}{3}} \int_0^{R_1} P_0 \cdot r^\alpha \cdot r \cdot d\tau d\theta}{\pi R_1^2 / 6} = \frac{2}{\alpha + 2} P_0 R_1^\alpha, \text{ 对第 } i \text{ 个 BS 的单一}$$

覆盖区内的 MS, 其干扰为

$$P_{1_umi} = \frac{2}{\alpha + 2} \sum_{k \in Q, k \neq i} P_0 \left(\frac{R_1}{d_k} \right)^\alpha + \frac{2}{\alpha + 2} \sum_{k \in T} P_0 \left(\frac{R_1}{d_k} \right)^\alpha \quad (8)$$

式(8)中第1项为本小区内其余2个BS的干扰, 第2项为相邻小区BS的干扰。由式(6), 式(8), BS的平均发送功率为

$$P_{tx, aver} = (1 - \beta) \frac{2}{\alpha + 2} P_0 R_1^\alpha + \beta P_0 R_1^\alpha \quad (9)$$

通过这种频率划分的方式, 在不增加天线和其他硬件的条件下, 可以将整个 TCCS 小区等效划分成4个独立的微小小区(Microcell)。在每个微小小区内, 考虑单个用户的情形。整个 TCCS 小区可同时支持4个MS。

3 三角形小区容量分析

本文采用遍历容量对小区的容量进行度量。设在单一覆盖区内, MS在不同位置, 不同信道衰落的遍历容量为 C_{umi} , 而在交叉覆盖区内同样的遍历容量设为 C_{cross} 。如上所述, TCCS 小区可以分成4个独立的微小小区, 同时支持4个MS, 那么, 整个小区的遍历容量为

$$C_{cell} = 3C_{umi} + C_{cross} \quad (10)$$

下面分别分析 $M = 1$ 和 $M = 3$ 时容量, 分别对应系统只采用发送分集和构成 3×3 MIMO 系统两种典型情况。

3.1 单天线 MS

在第 i 个 BS 单一覆盖区内, 单天线 MS 只与1个BS通信。由第2.1节, 此时第 i 个 BS 与 MS 间的信道为一个标量, $h_i = L_i h_{1,i}$ 。在某个固定的位置 P , 将式(8)代入 Rayleigh 衰落信道下遍历信道容量的香农公式得到 MS 的遍历容量, 为

$$\begin{aligned} C_{umi,P} &= E \left\{ \log_2(1 + P_{tx} |h_i|^2 / \sigma_{NI}^2) \right\} \\ &= E \left\{ \log_2(1 + P_0 d_i^\alpha L_i \chi_2^2 / \sigma_{NI}^2) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中, P_{tx} 为发送信号功率, σ_{NI}^2 为干扰与噪声的功率和, χ_2^2 为一个自由度为 i 的卡方分布, 其概率密度函数为 $f_{\chi_2^2}(x)$, 式(11)的值可由数值积分得出。单一覆盖区的遍历容量为

$$C_{umi} = E_P \{ C_{umi,P} \} \quad (12)$$

E_P 表示对 MS 的位置在单一覆盖区内遍历。

当 MS 位于交叉覆盖区时, 同时接收来自3个BS的信号, 利用最佳合并来提高信噪比和容量。根据文献[5]中分析, 此时 MS 在某点 P 的遍历容量为

$$\begin{aligned} C_{cross,P} &= E \left\{ \log_2 \left[1 + \sum_{i \in Q} |h_{1,i}|^2 L_i P_0 R_1^\alpha / \sigma_{NI}^2 \right] \right\} \\ &= \int_{x=0}^{\infty} \log(1 + \gamma) f_\gamma(x) dx \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)中 γ 为一个满足权重卡方分布的随机变量, 其概率密度函数为

$$f_\gamma(x) = \sum_{i \in Q} \frac{\sigma_{NI}^2 \lambda_i}{L_i P_0 R_1^\alpha} \exp \left(- \frac{\sigma_{NI}^2 x}{L_i P_0 R_1^\alpha} \right) \quad (14)$$

其中参数 $\lambda_i = \prod_{k \in Q, k \neq i} \frac{L_i P_0 R_1^\alpha}{L_i P_0 R_1^\alpha - L_k P_0 R_1^\alpha}$ 。对于整个交叉覆盖

区内的遍历容量, 同样有

$$C_{cross} = E_P \{ C_{cross,P} \} \quad (15)$$

3.2 3 单天线 MS

若 MS 有3根天线, 此时第 i 个 BS 与 MS 间信道为一个 3×1 的矢量 \mathbf{h}_i 。在第 i 个 BS 的单一覆盖区内, 3根天线作为接收分集使用。采用最佳合并方案, 将式(5)代入, 容量可写为

$$\begin{aligned} C_{umi,P} &= E \left\{ \log_2(1 + P_{tx} \mathbf{h}_i^H \mathbf{h}_i / \sigma_{NI}^2) \right\} \\ &= E \left\{ \log_2(1 + P_0 d_i^\alpha L_i \chi_6^2 / \sigma_{NI}^2) \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

再根据式(12)可以得到 MS 在单一覆盖区的遍历容量 C_{umi} 。

在交叉覆盖区, 3个BS和MS的3根天线构成一个 3×3 的分布式 MIMO 系统, 根据文献[2]中结论, 当采用发送接收联合分集的时候, MS 位于某点 P 的遍历容量下界为

$$\begin{aligned} C_{cross,P}^{low_bound} &= \sum_{i=n_T-(n_R-1)}^{n_T} \log_2(1 + P_{tx} L_i \chi_{2i}^2 / \sigma_{NI}^2) \\ &= E \left\{ \sum_{i \in Q} \log_2(1 + P_0 d_i^\alpha L_i \chi_{2i}^2 / \sigma_{NI}^2) \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

n_T 和 n_R 分别为发送天线数和接收天线数。在本文中, 将 $C_{cross,P}^{low_bound}$ 作为其遍历容量的度量, 令 $C_{cross,P} = C_{cross,P}^{low_bound}$ 。由式(15)可得 C_{cross} 。

4 数值仿真

为了便于分析, 以下取 R_1 为1。由第2.2节中设置, 则 BS 间的距离为2.5, 同时取频谱划分因子 β 为0.5, 使 MS 在单一覆盖区和交叉覆盖区内通信的频谱相同。

首先来分析 MS 的位置对于其接收信号与噪声干扰比(SINR)的影响。取 P_0 为20dB, 路径损耗因子 α 为4时, 单天线 MS 沿图1中直线 BP, BA 上不同位置的 SINR 如图3所示。横坐标为 R_1 归一化下, MS 离 B 点的距离, 纵坐标为 SINR。从图中可以看到, MS 在 TCCS 小区内的 SINR 比较均匀, 在 9.2dB-12dB 之间。在 $d = R_1$ 处, TCCS 的 SINR 有一个跳变, 这是由于由单一覆盖区进入交叉覆盖区后, 采用宏分集导致的 SINR 上的提升。而 GDAS 小区内 SINR 在小区中心 CCI 最小处到达最高值 10.6dB, 小区边缘 SINR 较低为 4dB, 小区内的 SINR 变化比较剧烈, CCI 的影响很明显。除了在中心 $d = 1.5R_1$ 附近外, SINR 均低于 TCCS。原因是采用频率规划后, 单一覆盖区内 MS 不与其它 BS 通信, 减少了 BS 的发送功率和 CCI, BS 在 F1 频段内发射的干扰功率较大, 但是只有邻小区干扰, 在 F2 频段内有小区内干扰, 但干扰功率较小, 平滑了小区内的 SINR。注意到图3中的结果为 TCCS 小区内有4个用户时的结果, 可以看出在支持更多用户情况下, TCCS 与 GDAS 相比, 在小区内更有高且更均匀的正 SINR。

其次分析不同最大发送功率下的遍历容量, 图4是当路径损耗因子 α 为4时, MS 有1根天线和3根天线的情况下, 在不同的 P_0 下遍历容量。由式(3), P_0 越大, 表示 BS 的最大发送功率越大。 P_0 较低时, 即低 SNR 环境下, GDAS 的容量约 TCCS 的 1/3 左右。当 P_0 在 5dB 和 25dB 之间时,

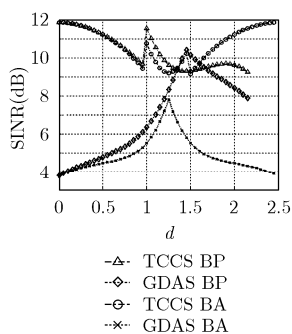


图3 小区内不同位置的 SINR

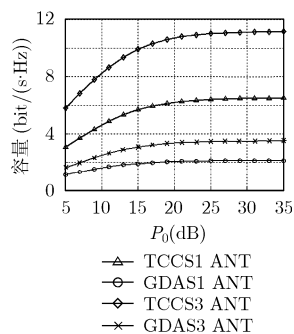


图4 3天线 MS 在不同 P_0 下遍历容量

TCCS 的容量增长比 GDAS 快, 这说明 TCCS 能比 GDAS 更有效地抑制增大发送功率带来的干扰。而在 P_0 大于 25dB 时, 即高 SNR 环境下, 小区容量不再随着 P_0 增加而增大。无论 $M = 1$ 或 $M = 3$, TCCS 的容量均为 GDAS 的约 3 倍。这是由于 TCCS 采用小区内的频率复用和远离 BS 处的交叉覆盖, 有效地提高频谱效率, 从而提升容量。

最后分析路径损耗因子 α 对容量的影响。让发送功率随 α 增大, 维持 P_0 不变。当 P_0 在 10dB, 15dB 和 20dB 时, $M = 1$ 和 $M = 3$ 两种情况的遍历容量如图 5 和图 6 所示。随着 α 的增大, 路径损耗增加, 降低了 CCI。可以看出, 两种小区结构的容量都是随着 α 的增大而线性增长的。 α 取不同值时, 即不同传播环境下, TCCS 的容量为 GDAS 的约 3 倍这一结论都成立。

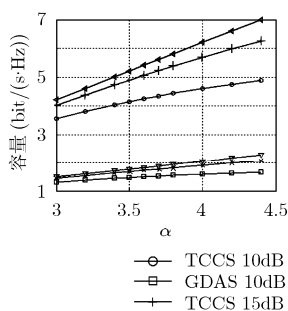


图5 1天线 MS 不同 α 下容量

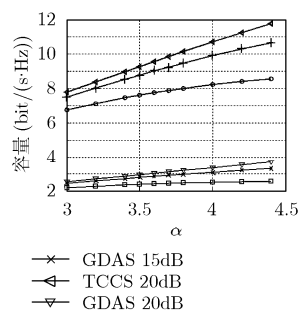


图6 3天线 MS 在不同 α 下容量

5 结束语

本文中提出了三角形小区结构下的频率规划方案, 在单一覆盖区内使用小区内频率复用, 在交叉覆盖区内使用宏分集, 且在相应的功率控制方案下, 分析了小区间的 CCI。

然后在每天线最大发送功率的限制, 相同天线, 相同平均发送功率和覆盖面积的条件下, 本文比较了 TCCS 和 GDAS 在 MS 不同天线数, 不同最大发送功率, 不同路径损耗因子各种情况下的遍历容量。结果表明, TCCS 的容量约为 GDAS 的 3 倍。这些增益是由 TCCS 通过宏分集降低了 CCI, 通过频率复用来提高频谱的利用率来达到的。

参考文献

- [1] Roh W and Paulraj A. Outage performance of the distributed antenna system in a composite fading channel. IEEE Vehicular Technology Conference Fall, Vancouver, Canada, Sept, 2002, 3: 1520-1524.
- [2] Foschini G J and Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Communications*, 1998, 6(3): 311-335.
- [3] Roh W and Paulraj A. MIMO channel capacity for the distributed antenna systems. IEEE Vehicular Technology Conference Fall, Vancouver, Canada, Sept, 2002, 2: 706-709.
- [4] Xiao L, Dai L, Zhuang H, Zhou S, and Yao Y. Information-theoretic capacity analysis in MIMO distributed antenna system. IEEE Vehicular Technology Conference Spring, Jeju Island, Korea, April 2003, 1: 779-782.
- [5] Wan Choi, Andrews J G, and Yi Chaehag. The capacity of multicellular distributed antenna networks. *Wireless Networks, Communications and Mobile Computing*, 2005 International Conference, Rhodes, Greece, June 2005, 2: 1337-1342.
- [6] Ni Zhi and Li Daoben. Effect of fading correlation on capacity of distributed MIMO. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 15th IEEE International Symposium*, Barcelona, Spain, Sept. 2004, 3: 1637-1641.
- [7] Wang Zhen, Lü Xingzai, and Zhu Jinkang. Information-theoretic capacity analysis in triangle cellular communication system. IEEE Vehicular Technology Conference Fall, Montreal, Canada, Sept, 2006, ISBN: 1-4244-0063-5.

吕星哉: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为分布式无线通信、无线资源管理。

王 振: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为分布式无线通信、信号处理。

朱近康: 男, 1943 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为扩频通信、个人通信、移动通信、无线通信。