



FDD-LTE 网络前向干扰及容量的建模分析

周 戈, 王军文

(中国电信股份有限公司深圳分公司无线网络运营中心 深圳 518034)

摘 要: 网内前向干扰是影响 FDD-LTE 网络容量和用户感受的重要因素, 对 FDD-LTE 的前向干扰和容量进行定量分析, 建立了在不同负荷条件下的前向干扰模型, 对理想组网结构和实际运营网络结构进行了仿真。仿真结果与华为实际路测结果基本一致, 且该模型为 LTE 网络实际运营负荷下的干扰及容量提供了精度较高的定量评估手段, 对业务发展和网络投资与优化有重要的指导意义。

关键词: 信噪比; 方向性; 容量; 速率

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015039

Model Analysis of FDD-LTE Forward Interference and Capacity

Zhou Ge, Wang Junwen

(Wireless Network Operations Center, Shenzhen Branch of China Telecom Co., Ltd., Shenzhen 518034, China)

Abstract: The forward interference is an important factor that affects the FDD-LTE network capacity and user experience. FDD-LTE forward interference and capacity were analyzed. A forward interference model was proposed under various network loads. Simulation result of ideal and practical network is approximate to the road test result. The model provides evaluation method with high precision for practical business network and it can provide important information for business development and network invest.

Key words: signal to noise ratio, directivity, capacity, speed

1 引言

LTE 网络作为高速数据网络, 理论上最高下行速率可以达到 150 Mbit/s, 但是随着网络负荷的不断增长, 下行速率的用户感受将不断下降。一方面, 本扇区用户争抢有限资源, 造成可分配资源不足, 限制了单个用户的下行速率; 另一方面, 相邻小区的干扰增加, 造成本扇区的信干噪比 (SINR) 下降, 只能采用较低效率的调制方式, 降低了速率。因此需要定量分析不同负荷情况下的干扰对本扇区 SINR 和下行速率的影响。SINR 的分析结果能反映无线环境可以提供的用户速率, 只有将无线环境能提供的下行速率和本扇区资源消耗情况结合, 才能得到真正的用户感受速率

和扇区容量。通过上述分析, 可以评估 LTE 网络质量和实际负荷下的容量, 发现网络存在的覆盖及参数配置问题, 同时可以发现负荷问题突出的区域, 为网络建设和优化提供数据指导, 提高资源的效率, 改善用户感受, 本文将对 LTE 的前向干扰模型进行建模, 定量分析不同负荷对用户感受和扇区容量的影响。

2 模型分析

2.1 问题的提出

FDD-LTE 网络采用 OFDM 技术, 1 个时隙 (7 个 OFDM 符号) 和 12 个连续子载波组成一个资源块 (resource block, RB), 系统以 RB 为单位为用户分配不同的时频资



源,因此各扇区内不同用户之间不存在干扰,干扰来自于相邻扇区的相同时频资源的碰撞。下行参考信号(reference signal,RS)在RB中呈均匀抽样分布,因此RS信道的 SINR 能够一定程度地反映 PDSCH(物理下行共享信道)的质量,这里信号功率 P_{rs} 为要考察扇区的 RS 信号所在时频资源的功率,噪声功率包括其他扇区的 RS 信道、PDSCH 和开销信道落到考察扇区相同时频资源上的功率 $P_{n_{rs}}$ 、 $P_{n_{pdsch}}$ 及 $P_{n_{overhead}}$ 再加上底噪 N 。即:

$$SINR = P_{rs} / (P_{n_{rs}} + P_{n_{pdsch}} + P_{n_{overhead}} + N) \quad (1)$$

这里的开销信道只考虑可能干扰 RS 的 PCFICH(物理控制格式指示信道)、PHICH(物理 HARQ 指示信道)、PBCH(物理广播信道)和 PDCCH(物理下行控制信道)。

2.2 天线模型

以往的研究为了简化分析,多采用半波振子的方向性函数进行分析,与现网真实天线参数相比误差很大。为了更精确地表征移动天线的特性,在水平方向采用了带反射板的板状天线的方向性函数,调整结构参数后,使其半功率波束宽度为 65° ,与现网天线参数一致,此时结构参数为 1.88,水平方向性函数为:

$$F_h(\theta) = \frac{\sin(1.88 \times \sin(\theta)) \times \cos(\theta)}{1.88 \times \sin(\theta)} \quad (2)$$

在垂直方向采用平行排列的八元半波振子侧射阵,其半功率波束宽度为 13° ,也与实际情况一致,其归一化后的方向性函数为:

$$F_v(\phi) = \cos(0.5\pi \times \sin(\phi)) \times \cos(\pi \times \sin(\phi)) \times \cos(2\pi \times \sin(\phi)) \quad (3)$$

图 1 是根据式(2)和式(3)绘制的天线水平方向增益和垂直方向增益,板状天线反射板对垂直方向信号强度分布情况影响较小,且假设方向前后比足够大,因此只需要

考虑 $-\pi/2$ 到 $\pi/2$ 范围内的方向增益。由式(2)和式(3)可得到总的方向性函数为:

$$F(\theta, \phi) = F_h(\theta)F_v(\phi) \quad (4)$$

2.3 传播模型

扩展的 Hata 模型是英国电信管理机构 Ofcom 针对载波频率为 800 MHz 和 2 600 MHz 的 LTE 网络室外覆盖所采用的传播模型,考虑到该模型宽阔的频率适用范围和对近距离的支持,符合频段分配和站间距离很小的现网实际,因此本文采用扩展的 Hata 模型。针对 2.1 GHz 的 FDD-LTE 频段,根据不同的距离范围,路径损耗 $L(d)$ 分别为:

$$L(d) = \begin{cases} 46.3 + 33.9 \lg(2000) + 10 \lg(f/2000) - 13.82 \lg(\max\{30, H_b\}) + \\ [44.9 - 6.55 \lg(\max\{30, H_b\})](\lg d)^\alpha - \alpha(H_m) - b(H_b), d \geq 0.1 \text{ km} \\ 32.4 + 20 \lg(f) + 10 \lg[d^2 + (H_b - H_m)^2 / 10^6], d \leq 0.04 \text{ km} \\ L(0.04) + [\lg(d) - \lg(0.04)] [\lg(0.1) - \lg(0.04)] \times [L(0.1) - L(0.04)], \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中, f 为载波频率, d 为移动台到扇区天线的地面距离, H_b 和 H_m 分别为天线高度和移动台的等效高度,当 $d \leq 20 \text{ km}$ 时, $\alpha=1$,修正项 $\alpha(H_m)$ 和 $b(H_b)$ 分别为:

$$\alpha(H_m) = (1.1 \lg(f) - 0.7) \times \min\{10, H_m\} - (1.56 \lg(f)) + \max\{0, 20 \lg(H_m/10)\} \quad (6)$$

$$b(H_b) = \min\{0, 20 \lg(H_b/30)\} \quad (7)$$

2.4 干扰模型

首先考虑理想的蜂窝状组网结构,基站分布在每个正六边形的 3 个互不相邻的顶点上,每个基站有 3 个扇区,如图 2 所示。每组 3 个箭头代表一个基站的 3 个扇区方向,其方向角(从正北方向开始顺时针转动的角度)分别为 30° 、 150° 和 270° 。以基站 O 为移动台的服务扇区,以该基

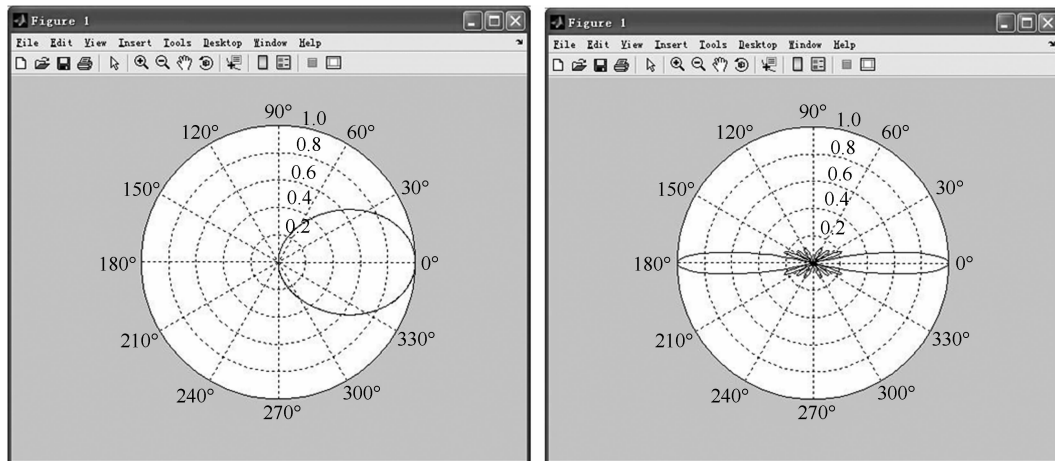


图 1 天线的水平方向增益和垂直方向增益

站为原点建立如图 2 中的直角坐标系。基站 O 的 1 扇区 (方向角为 30°) 覆盖区域即为阴影部分的平行四边形, 由于理想组网结构中扇区完全规则地分布, 因此考察该阴影区域的性能即可代表全网性能。设 P 为该扇区覆盖区域内任意一点, 其坐标为 (x, y) , 任意一个扇区天线所在的坐标为 (X_i, Y_i) , 则从扇区 i 发射的信号到达 P 点后, 在垂直方向偏离最大辐射方向的角度为:

$$\phi_i = |T_i - \alpha| = |T_i - \arctg(H_{bi} / \sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2})| \quad (8)$$

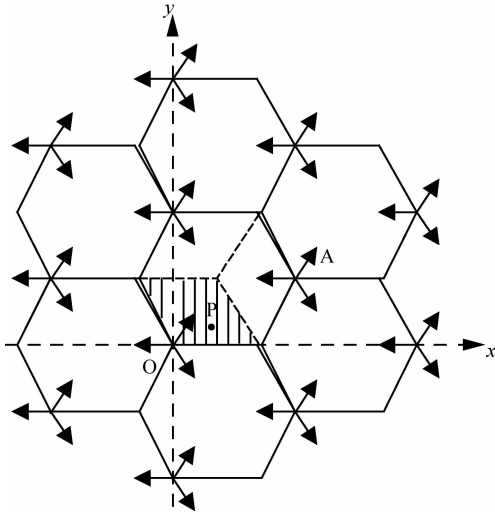


图 2 理想的蜂窝结构

其中, H_{bi} 是扇区 i 的天线高度, T_i 是扇区 i 的天线在垂直面上的下倾角, 如图 3 所示。

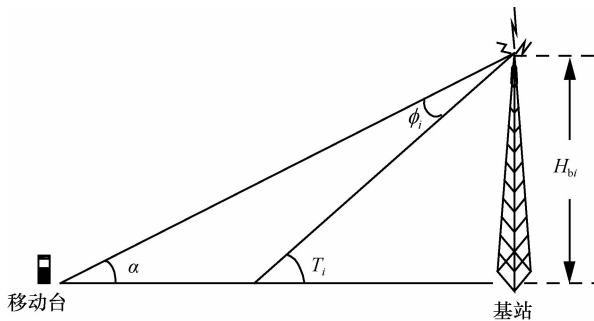


图 3 垂直偏离角度的计算

对于任意扇区 i (如基站 A 的第 3 扇区), 考察该扇区到 P (x, y) 点的信号在水平方向上偏离扇区最大辐射方向的角度, 该扇区天线的坐标为 (X_i, Y_i) , 可以得到向量 $\overrightarrow{AP}$ 的方向角 (以正北为起点顺时针转动的角度) β_i , 可以分为以下 4 种情况。

- 当 $x \geq X_i$ 且 $y \geq Y_i$ 时, $\beta_i = \arctg((x - X_i)/(y - Y_i))$ 。
- 当 $x < X_i$ 且 $y \geq Y_i$ 时, $\beta_i = \arctg((y - Y_i)/(x - X_i)) + 1.5\pi$ 。

- 当 $x \leq X_i$ 且 $y < Y_i$ 时, $\beta_i = \arctg((x - X_i)/(y - Y_i)) + \pi$ 。
- 当 $x > X_i$ 且 $y < Y_i$ 时, $\beta_i = \arctg((y - Y_i)/(x - X_i)) + 0.5\pi$ 。

则向量 $\overrightarrow{AP}$ 偏离扇区 i 天线的水平面最大辐射方向的角度为:

$$\theta_i = |\beta_i - A_i| \quad (9)$$

其中, A_i 为扇区 i 的方向角, 因此 i 扇区天线到 P 点的总功率损耗为:

$$T - L_i = F(\theta_i, \phi_i) F(\theta_i, \phi_i) / 10^{(L_i/10)} \quad (10)$$

其中, L_i 为根据式 (5) 计算的 i 扇区天线到 P 点的路径损耗。设各扇区天线输出功率都为 P_0 , 增益都为 G_0 , 则扇区 i 发射的信号到达 P 点后的功率为:

$$P_{pi} = P_0 G_0 F(\theta_i, \phi_i) F(\theta_i, \phi_i) / 10^{(L_i/10)} \quad (11)$$

设服务扇区的编号为 1, 周围模 6 干扰扇区数量为 n_1 , 非模 6 干扰扇区数量为 n_2 , 可以得到 P 点的信噪比为:

$$\begin{aligned} SINR_p &= P_{rs} / (P_{n_{rs}} + P_{n_{pdsch}} + P_{n_{overhead}} + N) \\ &= \frac{P_{p1}}{\sum_{k=1}^{n_1} P_{pk} + \sum_{m=1}^{n_2} (C_{ms} P_{pm} + C_{mo} P_{pm}) + N} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, C_{ms} 和 C_{mo} 分别为业务信道和开销信道资源碰撞标志, 表示在考察时刻扇区 m 的 RS 所在资源块是否被业务信道或开销信道占用, 取值为 0 或 1, 在仿真时根据 LTE 下行物理信道结构和该扇区负荷进行设定。

在网络结构和扇区工程参数一定的情况下, 式 (12) 是 P 点坐标 x 和 y 的函数。设理想蜂窝结构的扇区半径即正六边形的边长为 1, 因此考察区域内的平均信噪比可写为:

$$\begin{aligned} SINR &= \frac{1}{S} \iint SINR_p(x, y) dx dy \\ &= \frac{1}{S} \int_0^{0.5\sqrt{3}} \left(\int_{-y/\sqrt{3}}^{y/\sqrt{3}+1} SINR_p(x, y) dx \right) dy \end{aligned} \quad (13)$$

其中, S 为阴影区域面积。

采用华为分别在 5 Mbit/s 和 20 Mbit/s 带宽和不同 SINR 下单用户实测到的最大下行速率, 通过 5 次曲线拟合, 可以得到下行速率和 SINR 的关系为:

$$\begin{aligned} R(s) &= 0.05B(2.964 \times 10^{-6}s^5 - 2.665 \times 10^{-4}s^4 + \\ &0.0043s^3 + 0.1072s^2 + 1.0554s + 7.5127) \end{aligned} \quad (14)$$

其中, B 为下行带宽, s 为 SINR。华为实测的场景是孤站下单用户的速率测试, 其 20 Mbit/s 带宽实测数据见表 1, 5 Mbit/s 带宽和 20 Mbit/s 带宽测试数据曲线完全相似, 相同 SINR 下 20 Mbit/s 带宽速率为 5 Mbit/s 带宽速率的 4 倍,



表 1 华为 20 Mbit/s 带宽实测数据

SINR/dB	速率/(Mbit·s ⁻¹)
-10	1
-5	2.4
0	8
5	18.4
10	30
15	48
20	74
25	94
30	110
35	120
40	120

式(14)适用于符合验收标准的不同厂商的设备。

因此,考察区域内的平均下行速率为:

$$R_{\text{avg}} = \frac{1}{S} \int_0^{0.5\sqrt{3}} \left(\int_{-y/\sqrt{3}}^{-y/\sqrt{3}+1} R[\text{SINR}_p(x, y)] dx \right) dy \quad (15)$$

2.5 扇区容量

定义扇区容量为:在下行速率大于目标速率的同时,不间断下载数据的用户数量。在扇区覆盖区域中进行均匀选点,分别求区域内 n 个采样点的下行速率 $R_i, i=1, 2, \dots, n$ 。 R_i 表示第 i 个采样点扇区下只有一个用户时,该点能得到的最大速率。当扇区内有 m 个用户时,在没有引入 QoS 的比例公平调度资源的情况下,资源块将平均分配,因此 i 点能达到的速率为 $V_i=R_i/m$ 。假设用户在区域内均匀分布,如果 n 个采样点中有 k 个采样点能达到的速率大于目标速率,则扇区内能达到目标速率的用户数为 $C_m=m \times k/n$,设目标速率大于或等于 1 Mbit/s,则尝试计算不同 m 值下的 $C_m, m=1, 2, \dots, \text{int}(150/\text{目标速率})$,扇区的容量 $C=\max(C_m)$ 。

在引入 QoS 后,资源分配将会不平等,优先保证重点用户速率需求,即 SINR 差的重点用户可能比 SINR 好的普通用户获得更多的资源块,资源块利用效率和扇区容量会下降。而 QoS 对速率的限制策略则可能增加可以达到目标速率的扇区用户数量,具体的计算应根据具体的 QoS 策略而定。

3 仿真与分析

根据上述模型和计算式,对理想组网结构进行仿真,所有扇区半径为 300 m,所有天线倾角为 12°,天线高度为 30 m,移动台高度为 1 m,载波频率为 2.1 GHz,在考察扇区的覆盖区域周围对 41 个扇区进行了仿真运算,其中包

括 7 个与考察扇区存在模 6 干扰的小区。仿真负荷分别为 0、30% 和 50% 情况下的性能,结果见表 2。

表 2 理想组网结构仿真结果

负荷	SINR 大于 -3 dB 占比	平均 SINR/dB	平均下行 速率/(Mbit·s ⁻¹)
负荷为 0	99.69%	25.82	79.68
负荷为 30%	99.55%	20.38	56.79
负荷为 50%	99.23%	17.29	43.36

从表 1 可以看出,随着负荷的增长,区域平均 SINR 下降,从空载到 50% 负荷,平均 SINR 下降了 8.53 dB。

实际组网中,天线方向角、倾角、天线高度不可能统一,基站位置也不可能均匀分布。因此要反映实际情况,必须对真实组网结构进行分析。采用本文的模型在对考察区域进行分析时,只需要逐点进行运算,找到覆盖该点的信号最强的扇区,以该扇区作为移动台的服务扇区,其他扇区即为干扰扇区。本文采用提出的模型并依据真实工程参数对深圳科技园中区现网进行干扰分析,计算涉及该区域及其周边共 336 个扇区,得到的结果见表 3,图 4 是 SINR 在地理位置上的三维分布结果。

表 3 实际组网结构仿真结果

负荷	SINR 大于-3 dB 占比		平均下行 速率/(Mbit·s ⁻¹)
	本文仿真结果	华为路测结果	
负荷为 0	98.99%	98.29%	31.66
负荷为 30%	96.09%	95.04%	15.65
负荷为 50%	91.63%	91.56%	11.60

从图 4 可以看出,本文模型可以算出各采样点的 SINR,在空载情况下,各小区的主要干扰是相邻小区的模 6 或模 3 干扰,因此根据空载仿真运算结果,可以评估 PCI 规划的合理性,并通过 SINR 差的点发现模 6 或模 3 干扰严重的问题区域。

本文仿真结果与华为实际测试结果基本一致,验证了本模型的准确性。从图 5 可以看到,随着负荷的增长,大于 -3 dB 的 SINR 比例和平均下行速率变低。当负荷达到 90% 时,大于 -3 dB 的 SINR 比例降低到 73% 以下,即有 1/4 以上的区域 SINR 低于 -3 dB,在下行带宽为 20 Mbit/s 时,即使本扇区还有资源块,相应区域的下行速率也难以超过 5 Mbit/s。

通过第 2.5 节的容量运算方法,得到了科技园中区的所有扇区在各种负荷下的容量。当考察区域中的 71 个扇区覆盖区域的周边负荷分别为 0、30%、50% 时,各扇区达

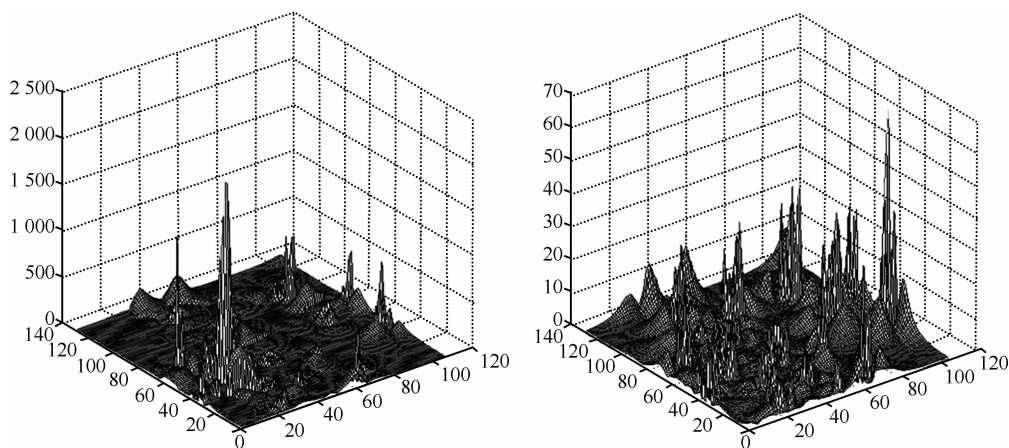
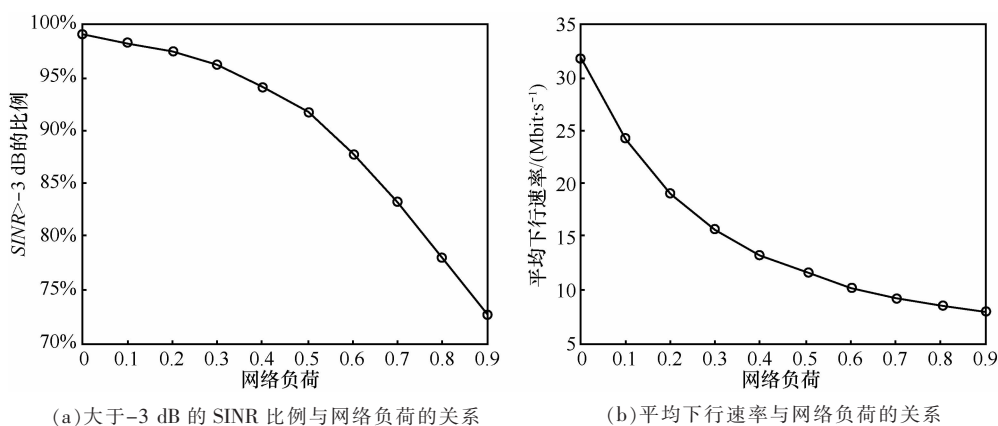


图4 空载和 50%负荷下 SINR 在地理位置上的三维分布



(a) 大于-3 dB 的 SINR 比例与网络负荷的关系

(b) 平均下行速率与网络负荷的关系

图5 大于-3 dB 的 SINR 比例、平均下行速率与网络负荷的关系

到或超过目标速率的平均用户数量(即平均容量)分别为 14.8 个、7.7 个和 5.8 个,可见周边负荷对扇区容量的影响非常大。

4 结束语

通过对理想组网结构和实际现网结构的仿真运算,得到了不同整体负荷下 SINR 分布情况。由于本文完成时中国电信还未正式放号,华为是通过命令对各扇区模拟加载相同负荷的信号后进行路测的,因此本文分析也假设各扇区采用相同负荷。当实际运营中话务和资源负荷上升后,各扇区负荷并不相同,此时同样能使用本文提出的模型,只需要将网管统计的各扇区资源块负荷数值带入相应扇区,就可以评估真实网络负荷对 SINR 的影响,并得到各个位置的信号覆盖和扇区容量,从而安排业务和网络投资及优化调整。另外,通过空载时的运算可以发现由于 PCI 配置不合理造成的模 3 或模 6 干扰区域。

参考文献

- 王建. 天线原理与设计. <http://www.mwrf.net/download/teaching/2014/1541>, 2014
Wang J. The principle and design of antenna. <http://www.mwrf.net/download/teaching/2014/1541>, 2014
- 谢处方, 邱文杰. 天线原理与设计. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985
Xie C F, Qiu W J. The Principle and Design of Antenna. Xi'an: Northwest Telecommunication Engineering College Press, 1985
- 赵明峰. LTE 传播模型浅析. 电信科学, 2013, 29(9): 117~126
Zhao M F. A brief analysis of radio propagation models for long term evolution. Telecommunications Science, 2013, 29(9): 117~126
- Ofcom. Second consultation on assessment of future mobile competition and proposals for the award of 800 MHz and 2.6 GHz spectrum and related issues. <http://stakeholders.ofcom.org.uk/consultations/award-800mhz-2.6ghz/summary>, 2012

(2015039-6 接排在 2015036-6 后)