



认知无线电中基于特征信念的协作频谱检测算法^{*}

郑红燕¹, 仵 博^{1,2}, 冯延蓬¹, 孟宪军¹

(1. 深圳职业技术学院 深圳 518055; 2. 中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

摘 要: 针对认知无线网络(CRN)中频谱检测准确性与检测效率难以平衡的问题, 本文提出一种特征信念的认知无线网络 ED/FD 协作频谱检测算法。通过单认知用户能量检测与特征信号检测协作模式代替多认知用户协作检测模式, 降低通信开销, 利用部分可观察马尔可夫决策过程(POMDP)对 CRN 建模, 将检测准确性与检测效率平衡优化问题转化为 POMDP 最优值函数求解过程, 并采用特征信念控制信念状态规模和在线最大报酬值迭代法求解逼近最优值, 降低算法复杂度。实验结果表明, 本文算法能有效取得频谱检测准确性与检测效率之间的平衡, 达到在不干扰授权用户的同时提高检测效率的目的。

关键词: 认知无线网络; 频谱检测; 能量检测; 特征检测; 部分可观察马尔可夫决策过程

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.02.015

Cooperation Spectrum Sensing Detecting Algorithm Based on Featured Belief Points in Cognitive Radio Network

Zheng Hongyan¹, Wu Bo^{1,2}, Feng Yanpeng¹, Meng Xianjun¹

(1. Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China;

2. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to solve the dilemma of the tradeoff between spectrum sensing performance and spectrum sensing efficiency in cognitive radio network, a novel ED/FD cooperation spectrum sensing algorithm based on featured belief points was proposed. Firstly, this algorithm deployed the single cognitive user energy detection and feature detection collaborative detection mode instead of multiple cognitive user cooperative detection, reducing communication overhead. Secondly, it modeled cognitive radio network under dynamic uncertainty using partially observable Markov decision processes (POMDP), and transformed the optimization of the tradeoff between sensing performance and sensing efficiency into yielding the optimal value function of POMDP. Finally, a novel approach using characteristics of belief to control the scale of belief states was presented, which exploited the maximum online reward value iteration algorithm to approximate the optimal value. The numerical results show that the proposed algorithm is able to meet the requirement of high tracking performance with constraint of low probability of interfering primary users.

Key words: cognitive radio network, spectrum sensing, energy detection, feature detection, partially observable Markov decision process

^{*} 国家自然科学基金资助项目(No.61074058, No.60874042), 国家教育部博士点基金资助项目(No.20090162120068), 广东省自然科学基金资助项目(No.S2011040004769)



1 引言

认知无线网络 (cognitive radio network, CRN) 是下一代无线网络的核心技术之一, 它允许认知用户/次用户 (second user, SU) 在不影响授权用户/主用户 (primary user, PU) 的前提下, 通过伺机接入临时空闲频谱资源, 实现频谱共享, 从而解决日益增长的频谱使用需求和低下的频谱使用率之间的矛盾, 受到国内外研究者的广泛关注^[1]。频谱检测技术是认知无线网络中最为基础与关键的技术之一, 是实现动态频谱共享技术的基本前提^[2]。受认知用户硬件条件限制及无线环境中多径及阴影衰减、噪声等不利因素的影响, SU 存在漏检、虚警等现象, 即检测准确性问题; 此外, 检测时间越长, 检测准确性越高, 但数据传输时间受损, 即为检测效率问题。因此, 构建合理的频谱检测算法, 取得检测准确性与检测效率之间的平衡是 CRN 频谱检测算法研究的热点和难点。

针对不确定性环境下的频谱检测问题, 国内外学者提出了多种算法。一类算法是通过多 SU 协作检测, 进行检测数据融合以提高检测准确性。如 Ghasemi 等^[3]提出基于多数判决 (K-out-of-N, KON) 的协作用户数据融合策略, 但多用户协作不可避免地增加了 SU 间的通信开销。另一类是基于马尔可夫决策过程 (Markov decision process, MDP) 的频谱检测算法。Gelabert 等人^[4]提出一种基于离散时间马尔可夫 (DTMC) 模型的 CRN 频谱检测框架, 但未给出参数最优解。Jayakrishnan 等人^[5]建立带约束条件的部分可观察马尔可夫决策过程 (partly observable Markov decision process, POMDP) 模型, 采用贪婪策略 (greedy policy) (简称 GP-POMDP 算法) 进行动态规划。基于 MDP/POMDP 的频谱检测算法的优点是能够对 CRN 真实客观地建模, 但是该类算法针对最优值求解存在“维数灾”问题, 在大规模下无法实现实时收敛。

基于以上算法的优缺点, 本文提出一种基于特征信念的无线认知网络 ED (能量检测)/FD (信号特征) 协作频谱检测 (featured belief points based ED/FD cooperation spectrum sensing, FB-EFCSS) 算法。该算法针对认知用户检测准确性受限的问题, 采用 ED、FD 相结合的手段, 在降低通信开销的同时提高检测准确性; 针对检测准确性与检测效率之间的优化平衡问题, 建立 POMDP 检测策略最优决策模型, 实现检测手段间的智能切换; 针对 POMDP 计算复杂度高的问题, 提出一种基于特征信念的在线

POMDP 求解算法, 实现离线动态规划和在线快速决策, 提高检测性能。

2 基于 POMDP 的协作模型建立

2.1 本地检测模式

目前典型的物理层检测技术包括能量检测法和信号特征法等。ED 通过采样和求模计算接收信号的能量值, 并与设置的门限比较, 超过判决门限, 就认为该频段内有 PU 正在占用。根据 Urkowitz 能量检测理论^[6], 任意 SU 本地能量检测过程可建模为一个二元检测问题, 其检测概率和误检概率可分别表示为:

$$P_{ED,d} = Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) \quad (1)$$

$$P_{ED,f} = \frac{\Gamma(u, \lambda/2)}{\Gamma(u)} \quad (2)$$

其中, u 是检测时间带宽积, $Q_u(\cdot, \cdot)$ 表示 u 阶 Marcum Q-函数, γ 是检测瞬时信噪比, λ 是检测门限, $\Gamma(\cdot, \cdot)$ 表示非完全 gamma 函数。

可见, ED 的优点在于可以快速获取信道状态, 但是在不确定噪声和 PU 信号较弱的情况下, 检测准确性较低。

FD 是利用无线通信系统中的调幅、调频、调相等信号一般具有循环平稳的特性, 检测 PU 对信道的占用情况, 其优点在于能够区分 PU 信号调制类型, 抵抗噪声的影响, 但是计算复杂量大, 检测时间较长。Verma P K 实验研究表明^[7], 在信噪比为 -30 dB~+30 dB 时, FD 误检率几乎为零, 则有 $P_{FD,f}=0, P_{FD,d}=1$ 。

由上述可知, ED 和 FD 存在优势互补, 当信道信噪比较高时, 采用 ED 可快速感知信道状态; 反之, 采用 FD 可准确地获取感知信道状态。因此, 本文提出一种 ED/FD 协作的频谱检测算法, 并利用 POMDP 建模, 实现 ED、FD 之间的智能切换, 既保证信道检测准确度又提高检测效率。

2.2 基于 POMDP 的认知无线网络协作检测模型建立

POMDP^[8]通常用六元组 $\langle S, A, T, R, Z, O \rangle$ 描述, 其中 S 为状态集, A 为动作集, Z 为观察集, $T(s, a, s')$ 为状态转移函数, 表示从状态 s 执行动作 a 到达状态 s' 的概率, $O(s', a, z)$ 为观察函数, 表示执行动作 a 到达状态 s' 得到观察 z 的概率, $R(s, a)$ 为报酬函数, 表示在状态 s 执行动作 a 得到的奖赏。

2.2.1 状态集及状态函数建模

状态集 S 表示所有信道占用情况, 用 $s'(n)$ 表示第 n 个信道在 t 时刻的状态。设信道状态均满足两状态马尔可夫

链特性, $s'(n)=0$ 表示信道空闲, $s'(n)=1$ 表示信道忙碌。动作集 A 表示 SU 所有可选的策略集合, a 表示 SU 在 t 时刻的动作。分别用 E, F, C 代表 ED, FD 和信道切换 (channel switch, CS) 3 种模式, 则 $A=\{E, F, C\}$ 。状态转移函数 $T(s, a, s')$ 表示信道状态在相邻时间片上的变化, 利用随机过程对信道流量进行建模, 假定 PU 和 SU 到达流量均满足泊松随机过程, 到达率为 η ; 信道使用持续时间满足负指数分布, 平均占用时间为 $1/\mu$ 。则系统信道状态转移概率定义如下。

定义 1 信道状态转移函数定义为:

$$T(s, a, s') = \begin{bmatrix} p(s=0, a, s'=0) \\ p(s=0, a, s'=1) \\ p(s=1, a, s'=0) \\ p(s=1, a, s'=1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-\eta)^{\tau_a} \\ 1-(1-\eta)^{\tau_a} \\ 1-(1-\mu)^{\tau_a} \\ (1-\mu)^{\tau_a} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, τ_a 表示不同模式所需要检测时间相对单位检测时间的标准系数, $\tau_a=L_d/L_s$, L_a 表示执行策略 a 进行单位信道检测所需要的时间, L_s 表示单位检测时间。

2.2.2 观察集及观察函数建模

观察集合 Z 为 SU 通过 ED 或 FD 检测得到的信道状态, $z'(n)$ 表示 t 时刻 SU 检测到的第 n 个信道的状态, $z'(n) \in \{0, 1\}$ 。受噪声等影响, SU 的信道检测结果与真实状态存在误差。观察函数 $O(s, a, z)$ 即用于反映这种不确定性, 其模型如图 1 所示。

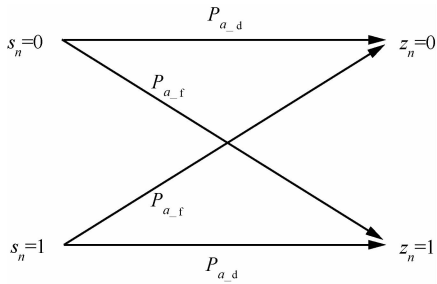


图 1 认知无线网络信道观察模型

其中, P_{a_d} 和 P_{a_f} 分别表示 t 时刻 SU 执行策略 $a(a \in \{E, F, C\})$ 时的检测概率和误检概率, 得出信道观察函数定义。

定义 2 信道观察函数定义如下:

$$O(s, a, z) = P(z | s, a) = \begin{bmatrix} P(s=0)P_{a_d} + (1-P(s=0))P_{a_f} \\ P(s=1)P_{a_f} + (1-P(s=1))P_{a_d} \\ P(s=0)P_{a_f} + (1-P(s=0))P_{a_d} \\ P(s=1)P_{a_d} + (1-P(s=1))P_{a_f} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2.3 报酬函数建模

报酬函数 $R(s, a)$ 反映不同信道状态下采取不同策略对系统的回报。假设单位信道带宽为 B , 当信道空闲时, 采用 ED 可以减小检测时间, 为数据传输预留时间, 提高信道检测效率。当信道忙时, 采用 CS 策略可及时切换到其他信道, 提高检测效率, 反之采用 FD 需在检测后才切换到其他信道, 检测效率低于 CS, 采用 ED 甚至存在误检风险, 导致 PU 通信受影响, 故定义报酬函数如下。

定义 3 在状态 s 下执行动作 a 的报酬函数定义如下:

$$R(s, a) = [R(0, E), R(0, F), R(0, C), R(1, E), R(1, F), R(1, C)]^T = [B, -B, -B, -\rho B, -B, \rho B_c]^T \times n_a \quad (5)$$

其中, $\rho \in (0, 1]$ 为检测效率调节因子, ρ 越大表示检测效率越高, 反之检测准确性越高。

通过 POMDP 建模, 利用状态转移模型反映信道状态变化规律; 利用观察模型反映检测策略与信噪比、检测时间的关系; 利用报酬函数反映检测策略对检测准确性和效率的关系, 将频谱检测问题转化为 POMDP 求解问题。

3 基于特征信念的在线求解算法

3.1 算法复杂度

通常 POMDP 求解是通过引入信念状态空间 B (表示信道状态的概率分布), 将 POMDP 转化为基于信念状态的 MDP 问题, t 时刻的信念状态 b' 由式 (6) 来计算。

$$b(s') = \eta O(s_t, a', z') \sum_{j=1}^{|S|} T(s_j, a', s_j) P(s' = s_j) \quad (6)$$

值函数 V 使用 Bellman 公式计算:

$$V^{t+1}(b) = \max_{a \in A} \left[\sum_{s \in S} b(s) R(s, a) + \gamma \sum_{z \in Z} P(z | b, a) V^t(b') \right] \quad (7)$$

最优策略 π^* 是使折扣报酬值和的期望值最大。

$$\pi^*(b) = \arg \max_a E \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t \sum_{s \in S} b'(s) R(s, \pi(b')) \right] \quad (8)$$

其中, γ 为折扣因子指数。

令 $|S|$ 为状态个数, $|A|$ 为动作个数, $|Z|$ 为观察个数, $|\Gamma^{t-1}|$ 为 $t-1$ 时刻信念状态数, 则整个值迭代计算过程的复杂度为 $O(|S|^2 |A| |Z| |\Gamma^{t-1}|^{|Z|})$ 。其中, $|\Gamma^{t-1}| = |A|^{\frac{|Z|^{t-1}-1}{|Z|-1}}$ 。因此, 求解 POMDP 最优策略是一个典型的“维数灾”问题。



3.2 特征信念裁剪

在线 POMDP 算法将整个 CRN 策略规划和策略执行过程根据时间限定条件分解成若干个小的策略规划和策略执行过程,通过构造有限深度可达信念状态与或树,控制信念状态空间规模,如图 2 所示。

为进一步减小信念状态空间的规模,缩短计算时间,针对信道状态两元特征,本文提出一种根据特征信念对与或树裁剪的算法。传统信念状态与或树构造过程中,从初始信念点出发,按照不同的动作、观察得到新的不同的信念状态,这些信念状态差别可能十分微小,如 $b_{a_1, z_1}(s=0)=0.561$, $b_{a_2, z_1}(s=0)=0.562$, 分别表示 SU 在执行策略 a_1 得到观察 z_1 和在执行策略 a_2 得到观察 z_1 时得到的信念状态,其物理含义为被检测信道处于空闲状态的概率。两者仅有 0.001 的差别,在最优策略选择上所起到的影响微乎其微,但在计算过程中仍为两个不同的信念点,随着迭代次数的增加,类似信念点的数量同样指数增长,大大影响算法求解速度。

基于以上分析,结合信道状态两元特征,将信念状态划分为若干等分的区域,取区域分界点为特征信念点。设将整个信念状态空间共划分为 m 个区间,则特征信念点集合如下:

$$\tilde{B}(s=0) = [\tilde{b}_1(s=0) = \varsigma, \dots, \tilde{b}_m(s=0) = m\varsigma] \quad (9)$$

其中, $\varsigma=1/m$ 。

3.3 在线策略求解

在线策略求解可以求取当前状态下的近似次优解,满足系统较低误差与较高实时性的双重需要,具体如下所示。

算法:在线规划和求解算法

定义:当前信念状态 b' , 信念状态与或树 T

//在线策略规划

(1)根据认知用户观察求取当前信念状态 b' ;

(2)构造以当前信念点 b' 为根的信念状态与或树 T ;

(3)按照特征信念法对信念状态与或树 T 进行裁剪;

//在线策略求解

(4)通过边缘节点向上传播算法计算 T 中的信念点 V ;

(5)求取 b' 下的最优检测策略 a^* ;

//在线策略执行

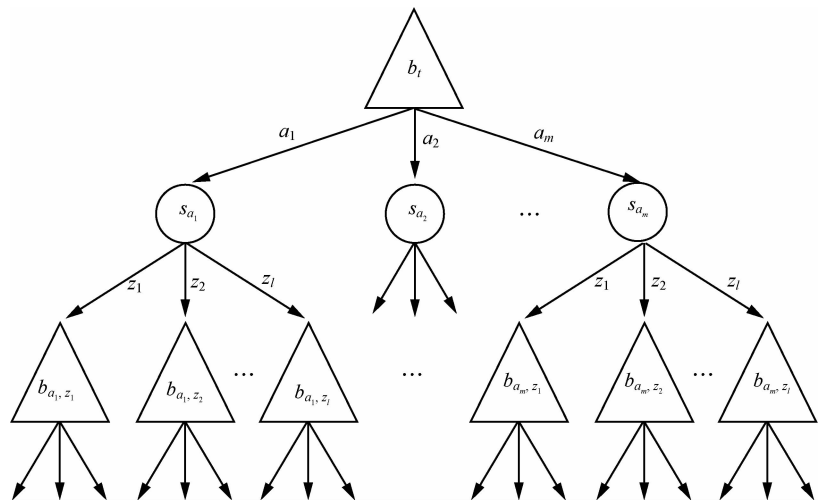


图 2 信念与或树示意

(6)根据最优检测策略进行信道状态感知;

(7)采集信道状态数据,根据 a^* 和 z 更新 b' ;

(8)返回(1)重新构造信念状态与或树。

由第 3.1 节分析可知,整个值迭代计算过程,复杂度为 $O(|S|^2 |A| |Z| |I^{n-1}|^{|Z|})$, 进行特征信念裁剪后, $|I^{n-1}|$ 最大为 $m(t-1)$ 。由此,算法复杂度由指数规模降至多项式规模,大大缩减最优策略计算时间。

4 仿真实验

利用 MATLAB 搭建仿真实验平台,从两个角度评价 FB-EFCSS 算法的有效性。首先,针对不同特征信念下 FB-EFCSS 的计算时间和报酬值进行纵向对比,验证信念点选取对算法性能的影响;其次,将 FB-EFCSS 与参考文献[7]中的 GP-POMDP 算法,在不同信噪比下的性能指标进行横向对比,仿真参数见表 1。

为验证特征信念点选取对算法性能的影响,固定信噪比为 10 dB,分别取信念状态空间区间数 $m=32, 64, 128, 512, 1024$ 进行实验,获取近似最优策略计算时间和报酬值,与 POMDP 精确解和 GP-POMDP 算法中的计算时间和报酬值进行对比,每组实验分别重复 10 次求平均值,结果见表 2。

表 1 仿真环境参数

参数	值
单位信道带宽 B	1 Hz
ED 检测门限 λ	5 dB
ED 检测时间带宽积 u	1
到达率 η	0.2 个 / ms
服务率 μ	1/120
折扣因子 γ	0.85

表 2 计算时间及报酬值

参数	计算时间(ms)	报酬值
$m=32$	13.9	0.54
$m=64$	27.4	0.74
$m=128$	136.4	0.90
$m=512$	546.1	0.92
$m=1\ 024$	1\ 042.5	0.93
精确解	1\ 478.6	0.98
GP-POMDP	1\ 456.8	0.94

可见,选取的特征信念点数越多,报酬值越接近精确报酬值,计算时间也越长,但均小于精确求解和 GP-POMDP 算法。当 $m \geq 128$ 后,计算时间仍快速增长,但报酬值增长趋缓,且与精确报酬值误差仅为 0.08,远小于 B ,故取 $m=128$ 。

针对认知用户检测准确率和检测效率随信噪比的变化情况,将本文算法 FB-EFCSS 与 GP-POMDP 算法进行对比。其中,检测准确率和检测效率的计算式如下:

$$\text{检测准确率} = \frac{\sum_{n=1}^N \text{if}(\text{信道检测状态} == \text{信道真实状态})}{N}$$

$$\text{检测效率} = \frac{\text{数据传输时长}}{\text{检测时长} + \text{通信时长}}$$

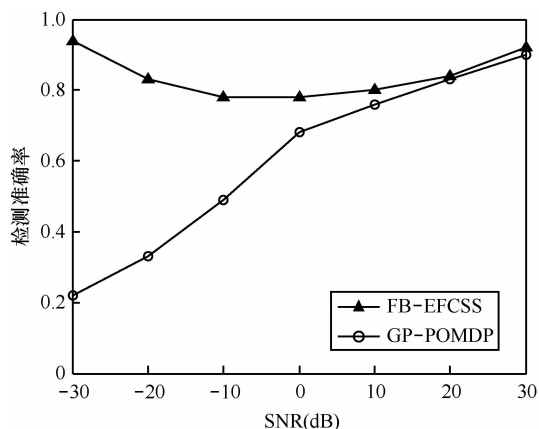
其中, N 为总信道数。在每种信噪比下进行 10 次实验求取平均值,结果如图 3 所示。

由图 3 可见,当信噪比较高时,两种算法均能获得较高的检测准确性和检测效率,但当信噪比较低时,GP-POMDP 算法由于检测准确性降低,造成重复检测,使检测效率明显下降;但本文算法在低信噪比时智能启动 FD 模式,保证检测准确性,但受 FD 检测时间影响,检测效率有小幅下降,但明显优于 GP-POMDP 算法。

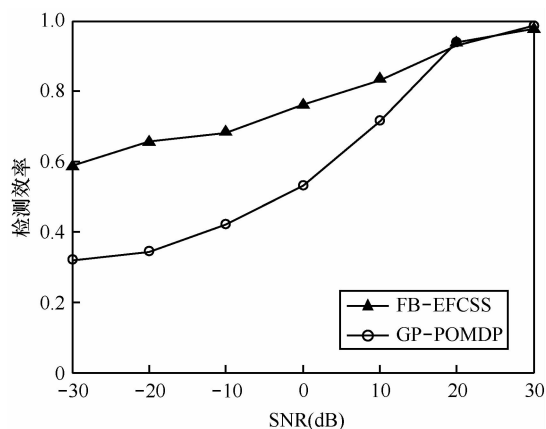
综上所述,基于 ED/FD 协作频谱检测策略,通过 POMDP 建模实现两种物理检测方法的智能切换,使 SU 在检测准确率和检测效率两项性能指标上均优于 GP-POMDP 算法,尤其是在信噪比较低的情况下,仍能保证较高的信道检测准确率和检测效率,从而有效保证了认知用户的通信质量。

5 结束语

认知无线网络频谱检测中检测准确性和检测效率是一对矛盾的指标,在保证检测准确性的条件下,提高检测



(a) 检测准确率



(b) 检测效率

图 3 检测准确率和检测效率随 SNR 的变化

效率是频谱检测的关键。本文综合能量检测和特征信号检测的优缺点,提出了 ED/FD 协作频谱检测策略,通过构建 POMDP 模型,实现检测策略的智能切换,并通过特征信念法缩短最优策略求解时间,通过仿真实验验证,表明根据信噪比智能切换的 ED/FD 协作频谱检测策略能显著地提高信道准确性和检测效率。

参考文献

- 1 Zhao Q, Sadler B M. A survey of dynamic spectrum access. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(3): 79~89
- 2 Liu Q, Gao J, Guan J X, et al. A survey on linker layer key technologies in cognitive radio networks. *Telecommunication Engineering*, 2010, 50(3): 90~98
- 3 Ghasemi A. Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs *IEEE Communications Magazine*, 2010, 46(4): 32~39
- 4 Gelabert X, Sallent O, Pérez-Romero J, et al. Spectrum sharing in cognitive radio networks with imperfect sensing: a discrete-time Markov model. *Computer Networks*, 2010, 54(14): 2519~2536



- 5 Unnikrishnan J, Veeravalli V V. Algorithms for dynamic spectrum access with learning for cognitive radio. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(2): 750~760
- 6 Urkowitz H. Energy detection of unknown deterministic signal. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(4):523~531
- 7 Verma P K, Taluja S, Dua R L. Performance analysis of energy detection, matched filter detection & cyclostationary feature detection spectrum sensing techniques. International Journal of Computational Engineering Research, 2012, 2 (5): 1296~1301
- 8 Ross S, Pineau J, Paquet S, *et al.* Online planning algorithms for POMDPs. Journal of Artificial Intelligence Research, 2008, 32(1): 663~704

作博,男,博士,深圳职业技术学院副教授,主要研究方向为智能决策、机器学习。

冯延蓬,男,硕士,深圳职业技术学院讲师,主要研究方向为智能决策、无线传感器网络。

[作者简介]

郑红燕,女,硕士,深圳职业技术学院工程师,主要研究方向为认知无线网络、序贯决策和机器学习。

孟宪军,男,博士,深圳职业技术学院讲师,主要研究方向为数据挖掘、模式识别等。

(收稿日期:2012-11-30)

·简讯·

2013 年 1 月通信业主要指标完成情况(一)

指标名称	单位	本年本月止累计到达	比上年同期累计	本月
电信营业收入	亿元	1 027.1	10.6%	1 027.1
其中:电信主营业务收入	亿元	871.6	6.8%	871.6
电信固定资产投资完成额	亿元			
固定本地电话通话时长合计	万分钟	2 772 671.9	-2.3%	2 772 671.9
区间电话通话时长	万分钟	288 191.9	-7.8%	288 191.9
区内电话及拨号上网通话时长	万分钟	2 484 480.0	-1.7%	2 484 480.0
固定长途电话通话时长合计	万分钟	527 629.7	3.2%	527 629.7
国内长途电话通话时长	万分钟	514 740.1	3.0%	514 740.1
国际电话通话时长	万分钟	7 707.7	19.4%	7 707.7
港澳台电话通话时长	万分钟	5 181.9	10.3%	5 181.9
移动电话通话时长合计(含本地)	万分钟	23 765 215.7	11.3%	23 765 215.7
移动电话国内长途通话时长	万分钟	5 285 730.5	18.1%	5 285 730.5
移动电话国际电话通话时长	万分钟	9 649.9	13.1%	9 649.9
移动电话港澳台电话通话时长	万分钟	8 388.9	6.1%	8 388.9
移动短信业务量	万条	7 702 895.4	-10.0%	7 702 895.4
移动互联网接入流量	万 GB	9 026.3	53.8%	9 026.3

注:(1)收入增长率按可比口径计算。(2)固定长途电话通话时长和移动电话通话时长均包含相应的 IP 电话通话时长。(3)通话时长各项指标均为去话通话时长。

(来源:工业和信息化部运行监测协调局)