

摘要: 星地之间日益增长的高数据率和大通信容量的通信需求,必须用光通信来实现,否则卫星光网与光纤光网之间将形成传输“瓶颈”,限制通信的发展。美国的激光通信演示系统、光通信演示和高速率链路设备、空间技术研究卫星2实验、同步轨道轻量技术实验、火星激光通信演示系统,日本的激光通信实验装置等均对星地光通信进行了有成效的探索。中国也在跟瞄(APT)、光相控阵和新型星地通信等研究方面不断探索。如何提高跟瞄系统的性能,如何克服空间大气影响,如何将数据传输率提高到每秒吉比特并实现低误码率,如何使卫星与地面光纤网相连将是未来星地光通信的发展趋势。

关键词: 星地光通信;原子滤波器;光学相控阵;一发多收

Abstract: The increasing demand for high-speed, large capacity data transmission between the earth and satellites may be solved by optical communications today. Otherwise, the satellite-to-earth communication will be constrained by the transmission bottleneck. Relevant researches have been done and resultfull achievements have been obtained, such as the Optical Communication Demonstration System, Optical Demonstration and High-speed Link Devices, STRV-2 Experiment, Geosynchronous Lightweight Technology Experiment (GeoLITE), and Mars Laser Communication Demonstration System (MLCD) developed by the US, as well as the laser communication experimental devices developed by Japan. Researches have also been conducted in China in the areas of Acquisition, Pointing and Tacking (APT), optical phased array and new types of satellite-to-earth communications. There are many problems that are expected to be solved in the future, such as how to improve APT performance, how to overcome the effect of space atmosphere, how to raise the data rate to Gigabit per second with low bit error rate, and how to link the satellite and earth optical networks.

Key words: satellite-to-earth optical communication; atomic optic filter; optical phased array

中图分类号:TN915.08 文献标识码:A 文章编号:1009-6868 (2006) 02-0052-05

星地光通信发展状况与趋势

Status and Trends of Satellite-to-earth Optical Communications

张诚/ZHANG Cheng, 胡薇薇/HU Wei-wei, 徐安士/XU An-shi

(北京大学 区域光纤通信网及新型光纤通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

(National Lab on Local Fiber-Optic Communication Networks and Advanced Optical Communication Systems, Peking University, Beijing 100871, China)

信息社会的发展需要一个传输数据率高、存储容量大、覆盖面积广的通信体系作为支撑。面对日益增长的对卫星通信容量和数据传输速率的需求,以微波为载体的通信技术已经不能满足,亟待开发新的通信载体和技术。

随着卫星激光通信关键技术的突破和激光所具有的优势逐步体现,业界的专家达成一致意见:面对日益增长的高数据率和大通信容量的需求,必须用光通信来实现卫星通信^[1]。未来世界的通信体系将是一个天上

卫星光网和地面光纤光网连接一起的空地激光通信体系,如图1所示。

在卫星光通信的各种链路中,又以星地光通信链路的实现最为困难。因为星地光通信的主要传输介质是大气,而大气的复杂性质将对在其中传输的激光的通信信号产生很大影响。但如果不实现星地之间的光通信链路,卫星光网与光纤光网之间将形成传输“瓶颈”,限制通信的发展。所以有必要对星地光通信进行详细的研究。

1 国际星地光通信发展现状

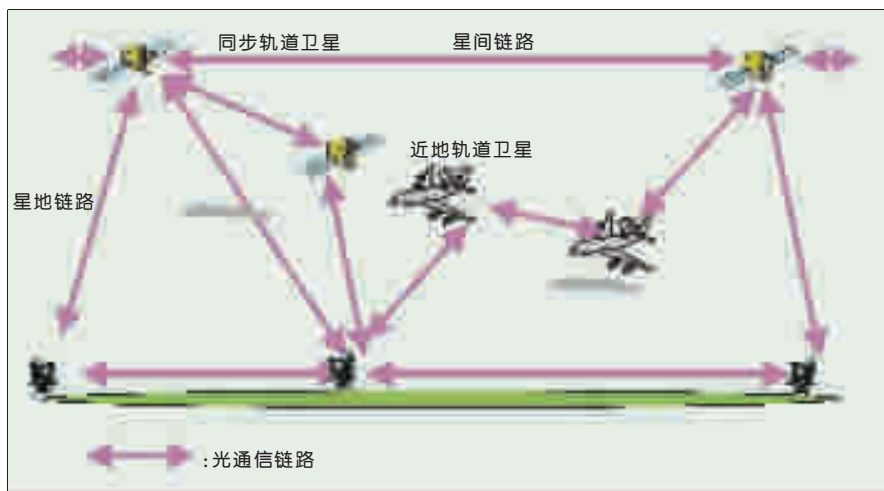
国际上,20世纪70年代初就开始

投入了大量的人力和物力进行空间光通信的研究^[2]。近十几年来更是取得了很大的进展,已经从开始的理论方案论证和实验样机研制,发展到工程化测试阶段^[3]。目前世界上卫星光通信发展较好的国家主要有美国、欧洲和日本。

1.1 美国星地光通信的发展

美国卫星光通信开展得较早,20世纪70年代即开始相关研究。但是由于美国初期的星地光通信研究往往由政府或军方主导,保密性较高。随着欧洲和日本卫星光通信的成功,越来越多的商业公司开始进入卫星光

基金项目:国家自然科学基金(60477002)



▲图1 空地激光通信体系

通信市场,美国卫星光通信的研究也变得开放和兴盛起来。

美国进行卫星光通信的领导机构是美国宇航局(NASA)和美国空军军方,主要的科研单位是加州理工大学的喷气动力实验室和麻省理工学院的林肯实验室。许多大公司,如Thermo Trex公司、Ball Aerospace公司等也进行了很多研究工作。以下介绍几个比较有代表性的研究成果:

(1)Thermo Trex公司的研究成果

Thermo Trex公司为美国军方进行光通信研究。他们建立空地激光链路的依据为:鉴于对流层大气的情况较为复杂,而平流层大气的情况较简单,可以利用在平流层中的飞机与卫星建立激光链路,将卫星下传的数据进行处理压缩后,再利用微波或激光发送到地面站,从而减小对流层大气对激光链路的影响。Thermo Trex公司研究成果中最特殊的一点就是首次将原子滤波器(FADOF)引入到跟瞄(APT)系统中,FADOF的带宽可以窄到0.01 nm,对本底光噪声有很强的抑制作用。实验表明,可以在大视场角(FOV)下取得较高的信噪比,从而实现目标的快速捕捉和锁定。

(2)激光通信演示系统

激光通信演示系统(OCD)由NASA支持的喷气动力实验室研制,其研制目的是实现一个可用于星地通信工

程模型的激光通信实验设备,是一个基于实验室的演示系统。OCD的设计集中了当时很多先进的技术,比如光束获取、高带宽的跟踪、精确光束瞄准和前馈补偿等技术。设备结构上包括:一个直径为10 cm的光学天线、一个用于空间获取的电荷耦合检测器(CCD)阵列、高带宽跟踪装置以及光纤耦合发生装置^[4]。设计通信数据率为250 Mb/s ~ 1 Gb/s (近地实验时),采用844 nm的通信波长和开关键控(OOK)方式进行快速数据调制。虽然OCD系统并没有进入实用化,但是其设计思路为后来很多喷气动力实验室的研究提供了借鉴。

(3)国际轨道空间站光通信研究

喷气动力实验室利用OCD系统成熟的研究技术,为国际轨道空间站(ISS)工程研究和技术发展计划(IS-SERT)研制了光通信演示和高速率链路设备(OCDHRLF)^[5]。该系统的目的是在近地轨道(LEO)距离上实现ISS与地面光学望远镜的激光通信链路。其设计通信数据率为2.5 Gb/s。空间站和地面的光学终端直径分别为10 cm和100 cm。其中ISS上使用的通信波长是1550 nm波长(不同于OCD),信标光使用980 nm波长。

(4)STRV-2实验

20世纪80年代末90年代初,美国

弹道导弹防御组织(BMDO)开始支持空间技术研究卫星2(STRV-2)研究。该研究目的在于演示LEO卫星TSX-5与地面站间的上行和下行激光通信,验证卫星与地面间的每秒吉比特速率通信是否可行。STRV-2的设计采用直接调制半导体激光发射和雪崩光电二极管接收。跟瞄装置采用二极管激光(852 nm波长)作为信标光,CCD成像器接收,铯原子线滤波器做本底光抑制。整个通信终端包括电子设备重14.5 kg,设计通信链路长度最大为2 000 km。

STRV-2实验系统采用了极化复用通信技术来提高通信速率,其设计通信速率为卫星到地面500 Mb/s × 2和地面到卫星155 Mb/s × 2。在天线设计上,发射端和接收端相互分离,TSX-5卫星上终端天线直径为1.6 cm(发射)和13.7 cm(接收),地面站上天线直径为30.5 cm(发射)和40.6 cm(接收)。同时为了减轻大气闪烁的作用,STRV-2系统采用了多个发射孔径,其中星上终端4路,地面终端12路^[6]。

TSX-5卫星于2000年6月7日发射升空,但是由于其ATP系统采用的是开环获取,即根据已有的星历表等轨道参数来进行跟瞄,而系统设计所依据的星历表与实际情况有误,所以卫星上光通信终端无法捕获到地面光通信终端发射的信号,使得STRV-2星地激光链路实验宣告失败^[7]。

(5)同步轨道轻量技术实验

2001年5月18日,美国军事侦察局(NRO)的同步轨道轻量技术实验(GEOLITE)卫星成功发射进入轨道。GEOLITE上携带了一个实验用的激光通信端机和一个工程用的超高频(UHF)通信设备,以进行激光通信试验和宽带通信试验。麻省理工学院的林肯实验室负责激光通信端机的设计^[8]。NRO对外宣布本次卫星实验非常成功,实现了激光通信链路,但未见进一步的详细报道^[9]。

(6)火星激光通信演示系统

NASA还进行了火星激光通信演

示系统(MLCD)研究。该系统由NASA、加州理工大学的喷气动力实验室和麻省理工学院的林肯实验室联合研制,目标是建立火星与地球行星距离的激光通信。设计的通信数据率为1~100 Mb/s,这是以前微波射频深空通信所无法比拟的。星上终端采用直径30.5 cm的天线,CCD成像接收,发射采用由半导体激光振荡器和掺铒光纤放大器(EDFA)组合而成的主振荡器功率放大器(MOPA)结构提高发射功率,采用脉冲相位调制(PPM)。地面终端采用1 m光学天线,4路多光束发射(另一种方案是6路直径30 cm光学天线多光束发射)。整个链路的通信波长采用1 060 nm可结合光纤技术的激光波长^[10]。

1.2 日本星地光通信发展现状

日本开始进行星地光通信研究的时间较美国要晚一些,但是他们的研究发展迅速,并于1995年与美国喷气动力实验室一起实现了世界上首次星地光通信链路,从而证明了星地光通信是可行的。日本卫星光通信的主要研究机构是邮电省的通信研究实验室(CRL)和日本宇宙开发事业团(NASDA)。日本电气公司(NEC)和东芝公司(Toshiba)也担负了一部分通信设备的研究。

CRL是日本进行星地光通信研究的领导机构,他们制订了详细的计划,集中了很多人力、物力进行研究,研究分3步实行:

- 第一步采用0.8 μm 波长的中等速率的通信系统(300 Mb/s \times 4)和1.5 μm 的高速率通信系统(1.2 Gb/s \times 2),已于2002年完成。
- 第二步将中等速率的通信系统进入实用化。同时研究0.8 μm 波长的中等速率的通信系统(1.2 Gb/s \times 4)和1.5 μm 波攻的高速率通信系统(10 Gb/s \times 2),计划2006年内完成。
- 第三步将高速率通信系统实用化。

目前日本星地光通信方面有激

▼表1 激光通信实验装置主要参数

参数	参数值
天线直径/cm	15
通信数据率/(Gb/s)	2.488
调制方式	采用归零脉冲强度调制
接收方式	电荷耦合检测器接收
演示方案	用保偏掺铒光纤放大器直接探测
地面天线直径/cm	10(发射)、50(接收)
通信时跟瞄波长/nm	680
通信波长(上行)/nm	1 562
通信波长(下行)/nm	1 552
上行功率/W	1
下行功率/W	0.4

光通信实验(LCE)和激光通信实验装置(LCDE)两个比较有代表性的研究。

(1)激光通信实验

日本的工程测试卫星6号(ETS-VI)上所搭载的LCE装置实现了世界上首次的星地激光链路。工程测试卫星6号于1994年8月发射升空,由于推进火箭故障,没有进入预定的地球同步轨道(GEO),缩短了生命周期。但通过CRL和美国喷气动力实验室的合作,采用了新的硬件和软件方法基本完成了全部测试。成果如下^[11,12]:

- 成功地实现了捕获和跟踪。在1994年12月和1996年7月期间实现了多次激光链路通信。
- 全双工通信。ETS-VI和地面站之间采用强度调制、直接探测技术实现了上行(510 nm波长氦离子激光)和下行(830 nm波长,13.5 mW砷化铝镓激光)链路。传输数据率为1.024 Mb/s,通信距离大于40 000 km。卫星上收发天线直径7.5 cm,地面接收天线直径1.5 m,发射天线直径20 cm。
- 测量了上行和下行链路光束的传播特性。
- 对光学器件在太空环境中的性能进行了测试。

实验中还发现,由于卫星上跟瞄采用机械装置,其平台的振动对跟瞄质量有较大影响,采用闭环方式较开环方式能更好地抑制振动的影响。

(2)激光通信演示实验

日本在第一个永久性载人国际空间站上设置了名为“希望号”的可装卸式实验舱——JEM,在该舱外的实验平台上搭载了LCDE,用于与地面和其他卫星进行超高速光通信实验。主要参数如表1所示^[13]:

1.3 美国和日本星地光通信研究

传输数据率比较

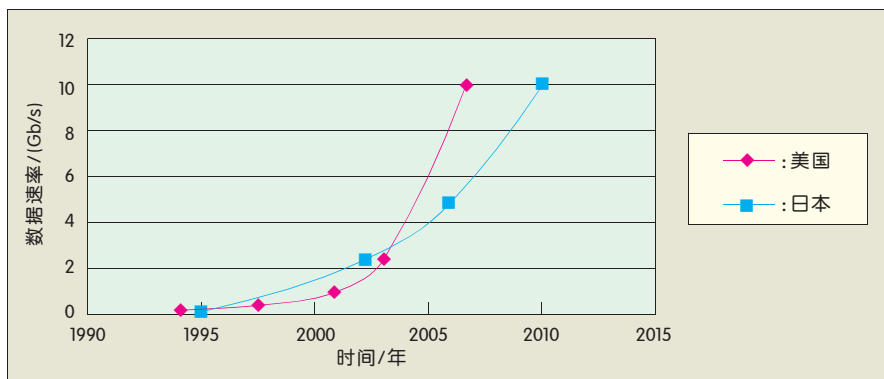
根据目前的研究现状和未来的发展趋势,可以统计和推测出如图2所示的美国和日本星地光通信传输数据率的比较图。

2 中国星地光通信发展现状

中国卫星光通信的研究相对国际发达国家起步晚,初期主要是器件等条件并不具备。20世纪90年代以来,随着中国激光通信器件的进步和对外开放度的增加,中国的许多科研单位都开始了对于卫星激光通信的研究,在一些领域里取得了突破性的进展。在各大科研单位中,卫星光通信特别是星地光通信开展较好的有北京大学、成都电子科技大学和哈尔滨工业大学等。

2.1 北京大学电子学系研究情况

从20世纪80年代末到90年代初,北京大学电子学系就开始了对于星地光通信的研究。目前,北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国



▲图2 美国和日本星地光通信传输数据速率的比较

国家重点实验室正在开拓两个方面的研究：光相控阵和新型星地通信方式。

20世纪90年代初，北京大学在中国首次研制出了原子滤波器(FADOF和VADOF)，并将其使用在卫星光通信的跟瞄技术上，从而取得了重大突破。北京大学利用原子滤波器的超窄带性在大视场角情况下获得了较大的信噪比，同时原子滤波器的多峰和可调谐性也能够很好地克服卫星移动所产生的多普勒效应^[14]。北京大学还在光通信的接收方面有所进展，采用了多量子阱器件实现了自差拍接收^[15]，同时采用Turbo码+信道交织的编码方式提高了接收信噪比^[16]。

光学相控阵（即采用相控阵列光学天线来实现光束的高速偏转）由于具有精度高、没有惯性、响应速度快等特点，成为目前国际上一个热门研究领域，在星地光通信中它可以作为信标光光束跟瞄的新方案。北京大学在这方面的研究也有一定的进展^[17]。星地光通信方式的目的是在提高通信速率的同时降低误码率，目前北京大学正在开发采用一发多收和高空中继平台的通信方案，从波长、信道、系统等多方面研究最佳光信号检测方式和信号处理技术。

2.2 其他单位研究情况

电子科技大学物理电子学院的激光通信实验室从20世纪90年代开始进行卫星光通信的研究，主要研究方向是：大气信道对空地光通信的影

响及相应解决方案、APT技术与系统设计、调制/解调和光学编码方案、背景光抑制、光学天线设计、卫星激光通信系统实验仿真等。研究成果某些方面已接近国际水平。

哈尔滨工业大学可调谐激光实验室从20世纪90年代初开始卫星光通信的研究，分别在卫星APT技术和扫描方案、卫星振动对误码率的影响和消除方案、恒星背景噪声抑制、卫星激光通信系统设计方面取得了一定的进展。主要发展重点是建立卫星间激光链路，目前已进入工程化实用阶段。2005年开始，他们对于月地之间激光链路的建立的可行性进行了一定的探索^[18]。

武汉大学激光通信实验室、中国科学院上海光学精密机械研究所等科研单位也对卫星间光通信进行了一些探索性研究^[19]。

3 星地光通信未来的趋势

世界各国星地光通信的研究发展很快，而且都各有特点，中国各大科研机构也各有自己的研究重点。星地光通信研究未来的较可能的发展趋势为：提高APT系统的性能、提高通信数码率和降低误码率、使卫星和地面光纤网相连。

(1) 提高APT系统的性能

虽然APT技术已经在世界上发展了几十年的时间，但是空间实验表明，目前的APT技术还无法保证星地间激光链路长时间稳定的通信，一点

很小的误差可能导致激光链路根本无法建立连接，STRV-2实验的失败就是一个例子。所以进一步提高APT系统的性能（如跟瞄精度、扫描时间、系统带宽等），克服卫星平台振动的影响将是未来星地光通信技术发展的重点。

(2) 提高通信速率和降低误码率

星地光通信是为了解决卫星与地面的微波通信的“瓶颈”而产生的，现在微波通信的数据速率已经可以达到600 Mb/s以上，而目前已公布的成功星地光通信链路的数据率仅有1.024 Mb/s。所以如何提高数据传输率到每秒吉比特以上，应对未来微波通信的挑战将是星地激光通信的一个发展方向。高功率激光器和高速率调制技术将是研究重点。在提高通信速率的同时还要注意对误码率的控制，原子滤波器的应用将成为星地通信系统不可缺少的一环。

(3) 使卫星和地面光纤网相连

在星地光通信发展的早期，许多系统都使用800 nm作为激光通信波长，其间也有1 060 nm左右的系统出现。随着贝尔实验室、SDL公司、Lucent公司和USAF Phillips实验室相继研究证明陆地上光纤通信技术也能在空间技术上适用，越来越多的激光通信系统将采用与地面光纤成熟技术相适应的1 550 nm左右波长的激光作为通信波长，而且地面上的光纤技术，如MOPA，也越来越多地应用于卫星激光通信。

可以预想未来的星地光通信系统将是一个将卫星和地面光纤网之间相连的系统。

总的来说，星地光通信是一个很有潜力的通信技术发展方向，无论是为了促进经济建设还是科学技术发展，中国都应当大力加强这个领域的研究。

感谢柳迪、顾闻博对本文的贡献。同时也感谢为本文研究提供支持的北京大学校长基金、北京大学工程研究院“985”基金、国家自然科学基金

金(60477002)。

4 参考文献

- [1] 肖海桥,段明浩. 极有潜力的卫星光通信[J]. 光电子技术与信息, 1997,10(4):1-4.
- [2] Koepf G A. Space Laser Communications: A Review of Major Programs in the United States[J]. International Journal of Electronics and Communications, 2002,56(4):232-242.
- [3] Pelton J N, Mac Rac A U, Bhasin K B, et al. Global Satellite Communications Technology and Systems[R]. International Technology Research Institute, 1998.
- [4] Hemmati H. Status of Free-Space Optical Communications Program at JPL [C] //Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Vol 3, May 18-25, 2000, Big Sky, MT, USA. Piscataway, NJ, USA:IEEE, 2000:101-105.
- [5] 贾潞华,雷建设,黄肇明. 空间激光通信系统组成及其发展[J]. 光电子技术与信息, 2001,14(2):29-34.
- [6] 于思源,马昆,谭立英. 自由空间激光通信技术发展趋势分析[J]. 光通信技术, 200,28(12):47-50.
- [7] Kim I I, Riley B, Wong V M, et al. Lessons Learned from the STRV-2 Satellite-to-ground Lasercom Experiment[C] //Proceedings of SPIE, Vol 4272. Jan 24-25, 2001, San Jose, CA, USA. Bellingham, WA, USA:SPIE Press, 2001:1-15.
- [8] Begley D L. Free-Space Laser Communications: A Historical Perspective[C] // Proceedings of 15th Annual Meeting of the IEEE on Lasers and Electro-optics Society, Vol 2, Nov 10-14, 2002, Piscataway, NJ, USA, IEEE:2002:391-392.

- [9] NRO Awarded the David Packard Excellence in Acquisition Award. [EB/OL]. [2006-02-14]. http://www.nro.gov/PressReleases/prs_rel62.html.
- [10] Townes S A, Edwards B, Biswas A, et al. The Mars Laser Communication Demonstration[C] //Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Vol 2, Mar 6-13, 2004, Big Sky, MT, USA. Piscataway, NJ, USA:IEEE, 2004:1180-1195.
- [11] 陈彦. 空间光通信综述[J]. 国际太空, 2003(1):27-29; (2):28-29.
- [12] 尹道素, 皮德忠. 日本空间光通信技术的发展状况[J]. 电子科技大学学报, 1998,27(5):546-551.
- [13] 野田抱子. 在空间站上进行光通信实验[J]. 邵毅, 译. 激光与光电子学进展, 2002,39(1):15-19.
- [14] 刘璐, 王江波, 俞水清, 等. 采用级联原子滤波器的新型卫星激光链路系统研究[J]. 光学学报, 2004,24(12):1590-1594.
- [15] 刘璐, 汤俊雄, 石珏, 等. 采用多量子阱器件的无线光通信差拍接收方案研究[J]. 光学学报, 2004,24(8):1079-1084.
- [16] 谢伟良, 刘璐, 汤俊雄. 无线光通信差拍控制系统的时延特性[J]. 中国激光, 2004,31(5):575-578.
- [17] Xiao F, Hu W W, Xu A S. Optical Phased-array Beam Steering Controlled by Wavelength[J]. Applied Optics, 2005,44(10): 5429-5433.
- [18] 胡渝, 刘华. 空间激光通信技术及其发展[J]. 电子科技大学学报, 1998,27(5):453-461.
- [19] 徐科华, 马昆, 谭立英. 可行的月地激光链路分析[J]. 光通信技术, 2005,29(5):17-19.

收稿日期:2006-02-14

作者简介



张诚, 北京大学信息科学技术学院电子系在读本科生, 主要研究方向为星地光通信。



胡薇薇, 北京大学信息科学技术学院电子系副教授, 主要研究方向为ROF通信、光学相控阵、星地光通信等。



徐安士, 北京大学信息科学技术学院电子系教授, 博士生导师, 区域光纤通信网及新型光纤通信系统国家重点实验室主任, 光子与通信技术研究所所长, 电子学系主任, 院学术委员会委员。国家教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会委员, 国家教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员, 欧美同学会美国分会理事, 美国光学学会会员。

上接第51页

对于扰码组的分配, 还要充分考虑实际规划小区覆盖大小, 结合地域的实际情况考虑PSC的复用距离, 尤其是地区边界的扰码分配要进行统一规划。另外要根据网络发展的情况适当保留一些扰码组的PSC以备网络扩容使用。

在实际的扰码规划中, 为了使移动台尽快地搜索到小区、与邻区建立同步, 从而达到允许快速切换的目的, 要求小区和它的邻区扰码应该属于尽可能少的扰码组。因为每多解调一个扰码组, 就需要额外的20 ms时间^[2]。由此可见, 合理地根据网络结构和无线环境来规划扰码是非常重要的。如在密集城区, 高密度站点形成了较为复杂的邻区列表和切换关系, 就应该使用比较少的扰码组, 以减少搜索时间, 提高网络质量。所以实际规划中并不是所有的扰码组都

会使用完, 具体使用的数量要根据将来实际网络规划情况来定。另外如果网络使用了第二个载波, 所有的扰码就可以重复使用。

3 结束语

由于WCDMA系统中引入了新的业务需求以及在系统无线接口等方面不同于第二代GSM系统, 所以在无线网络的规划设计方面也就不同于GSM系统。本文对WCDMA系统中扰码规划问题做了详细的探讨, 从中可以看出扰码规划的主要原理是在码资源允许的情况下结合地域的实际特点, 使PSC的复用距离尽量大。同时在进行扰码规划时, 采用基于扰码组的规划方法可以加速移动台的小区搜索过程, 而且规划起来比较灵活、简单。所有这些结论对于WCDMA系统无线网络规划工程师具有较好的指

导意义。

4 参考文献

- [1] 张长钢, 孙保红, 李猛, 等. WCDMA无线网络规划原理与实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [2] Wang Y-P E, Ottosson. Cell Search in W-CDMA[J]. IEEE Journal on Selected in Areas Communications, 2000, 18(8): 1470-1482.

收稿日期:2005-08-18

作者简介



梅辉, 南京邮电大学毕业, 硕士。现工作于中国移动江西分公司网络管理中心, 从事全省的网络优化和规划工作以及3G网络的规划研究工作。