

平流层艇载 CDMA 系统的嵌入式多波束天线方案

程月波^{①②} 金荣洪^① 刘波^① 耿军平^①

^①(上海交通大学电子工程系 上海 200030)

^②(烟台师范学院物理与电子工程系 烟台 264025)

摘要 该文改进了原先提出的微/宏波束天线覆盖方案,采用更为复杂但更贴近实际的模型,尤其是改进了艇载天线波束方向图和信道干扰的计算方法。该方案应用于平流层通信 CDMA 系统,通过在宏波束覆盖范围中嵌入微波束,解决平流层通信系统中由于用户分布失衡而引起的热点问题。针对不同的用户分布和热点位置,文中给出了调整微波束实现系统容量最大化的优化方法。仿真结果表明在用户分布失衡、热点位置变化等情况下使用本文的嵌入式波束覆盖方案仍然可以保持高而稳定的系统容量。

关键词 CDMA 系统,平流层通信,多波束天线,嵌入式波束,热点

中图分类号: TN926+.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)08-1395-05

An Embedded Multibeam Configuration for CDMA Communication Systems on HAPS

Cheng Yue-bo^{①②} Jin Rong-hong^① Liu Bo^① Geng Jun-ping^①

^①(Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

^②(Dep. of Physics and Electronic Engineering, Normal College of Yantai, Yantai 264025, China)

Abstract An improvement of the micro/macro beam configuration used in HAPS (High Altitude Platform System) CDMA systems is proposed, in which the model employed for the optimization of the system is complex but more practical, especially in the improvement of the array pattern and the calculation of channel interferences. The configuration is expected to satisfy the requirement of CDMA systems on HAPS, and the relief of traffic burden in hot spot areas can be achieved by embedding micro-beams in the macro-beams at the hot spot locations. The optimization is realized by the adjustment of the micro-beam for different user distributions and different hot spot locations. The numerical results show that the hot spot problem can be relieved efficiently with the presented structure, and a higher and more stable system capacity is expectable despite the variation of the user distribution.

Key words CDMA systems, HAPS, Multi-beam array antenna, Embedded beam, Hot spot

1 引言

作为一种新的通信信息平台,平流层通信平台(HAPS)的研究和应用得到越来越多的关注,该通信平台在中国有广阔的发展前景^[1,2]。平流层通信平台通过多波束天线对覆盖区域进行分区覆盖,而且因为它应用CDMA和SDMA混合接入技术,使得宽带通信网系统容量和频谱利用率的大幅度提高成为可能。无疑多波束天线技术是平流层通信平台的关键技术之一,对于无线通信系统的链路设计来说研究多波束天线覆盖结构是非常必要的。

近几年,对于平流层通信 CDMA 系统主要有两种多波束覆盖方案。文献[3]给出了基于均匀划分的波束覆盖方案,

将一个圆形覆盖区域划分为 361 个均匀大小的蜂窝小区。文献[4]提出了一种更具可实现性的划分方案,将覆盖区域划分 5 层,每一层的艇载波束都采用相同大小的圆形波束进行覆盖,因而每个小区地面实际覆盖区域为椭圆形。然而,在 CDMA 系统中,用户密集区域的存在往往造成该小区的通信阻塞,而周围邻近用户分布较为稀疏的小区,往往存在通信资源的浪费。这样的现象通常称为热点问题(hot spot)。由于 HAPS 的地面覆盖区域比现有的地面蜂窝系统大得多,要求地面用户在覆盖区域内均匀分布是不现实的,因而热点问题的研究对 HAPS 系统更具有现实意义。从这个意义上说,无论文献[3,4]的哪个方案都不是 HAPS 艇载多波束天线的最佳选择。为此,本研究组提出了一种嵌入式多波束天线方案^[5],用以解决 HAPS 系统中的热点问题,可以有效地提高基于

HAPS的CDMA系统的容量。

在传统的CDMA地面移动通信系统中,宏蜂窝/微蜂窝系统结构能够提高热点区域、阴影区域和乡村地区的系统容量^[6,7]。文献[5]将传统地面蜂窝系统中的宏蜂窝/微蜂窝概念引入HAPS中,提出了一种相似的两层覆盖结构,称之为嵌入波束结构(EBS),即对一个较大区域提供传统的均匀覆盖波束结构(UBS),采用大型的波束(宏波束),而对其中存在的特定用户密集区提供小型嵌入波束(微波束)。这种波束结构的最大特点在于微波束和宏波束之间的功率比可控性和微波束的覆盖区域根据用户分布的实时可控性,有了这一特点,无论用户如何分布总的系统容量总能保持在最佳状态。而且通过仿真,证明了这一结构的有效性。但是文献[5]所用两个波束的模型和仿真所用方向图过于简单,与实际情况不符。本文在文献[5]的基础上继续研究,在继承其优点的同时采用了更为贴近实际的模型及仿真并在给出实际方向图的基础上修正了信噪比的计算方法,进一步证明了该结构的有效性。

2 模型与仿真

在平流层平台所服务的无线通信系统中,同信道干扰是天线辐射宽度,角度及旁瓣电平的函数,且与用户分布密度密切相关,下面给出本文所采用的天线数学模型,并假设用户分布呈高斯分布,以 CDMA 语音传输部分为例,研究分析以上行信道容量为参考。

2.1 天线波束的数学模型

缝隙天线由于其在毫米波段良好的辐射特性及实用性,往往为平流层平台所用。根据文献[8]缝隙天线的主瓣模型可以通过余弦函数的 n 次幂逼近方便地得到,其方向性系数近似为

$$D = (\cos \theta)^n \frac{32 \log 2}{2 \left(2 \arccos \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right) \right)^2} \quad (1)$$

其中 θ 表示关于天线视轴的角度, n 代表模型的滚降系数, n 可以由下式得到。

$$\left(\cos \frac{\theta_{3dB}}{2} \right)^n = 0.5 \quad (2)$$

θ_{3dB} 表示 3dB 波束宽度。图 1 所示为天线滚降效果图。

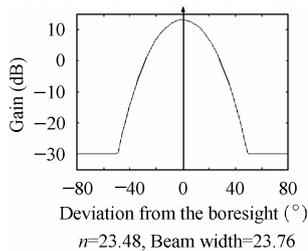


图 1 天线方向图
Fig.1 Pattern of antenna

2.2 用户分布

假设外围 6 个小区用户均匀分布,其用户数量均为 N_{neigh} 。中心小区用户密度服从高斯分布:

$$\rho(r) = \frac{N_{neigh}}{\pi R^2} \rho_0(r) \quad (3)$$

其中 $\rho_0(r)$ 为相对密度分布:

$$\rho_0(r) = 1 + A \exp \left(-\frac{B \pi r^2}{R^2} \right) \quad (4)$$

中心小区用户数目 N 可通过如下积分得到:

$$N = \int_S \rho(r) ds \quad (5)$$

其中 S 表示所计算区域的面积。

2.3 EBS 覆盖方案

图 2 采用了覆盖阴影完全相同(半径为 R)的 7 个波束覆盖参考区域,假设在参考区域中存在一个半径为 R 用户密集区域,且该用户密集区位于中心小区,在用户密集区域的宏波束中嵌入半径为 R_{mic} 微波束,如图 2 所示,其余部分则仍由宏波束覆盖。注意与宏波束不同,微波束的大小和位置是可调的,这是嵌入波束结构一个重要特点,也是提升系统性能的稳定性的主要手段,其价值将在下一节证明。

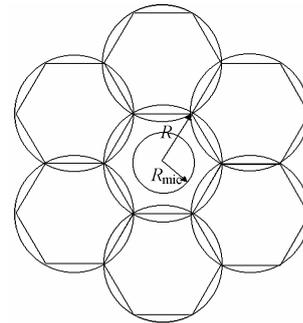


图 2 嵌入波束结构
Fig. 2 Structure of embed beam

2.4 容量计算

在 CDMA 系统中,上行链路容量受同一小区和其它相邻小区用户干扰的限制,我们考虑一个采用 CDMA 技术的平流层信息平台(HAPS)位于其服务区域 22km 高空保持相对静止状态,忽略地球曲率。下面给出嵌入式波束结构计算系统容量的表达式。

由于天线尺寸相对于平流层平台的高度而言可以忽略,可以假设各小区所对应的基站处于同一位置,不同小区之间干扰的几何关系如图 3 所示,其中 $\phi_{0,ij}$ 和 ϕ_{ij} 分别表示从各基站看过去移动用户与视轴所呈角度, r_{ij} 表示移动用户到他的服务小区中心的距离。

假设各相邻小区有相同的用户密度 ρ ,并且通过理想功率控制,各移动用户到平流层平台的接收功率都为 P , α 表示语音激活系数, $G(\varphi)$ 表示天线增益,根据方向性系数与天线增益的关系,在仿真时可用上文所提到的方向性系数表

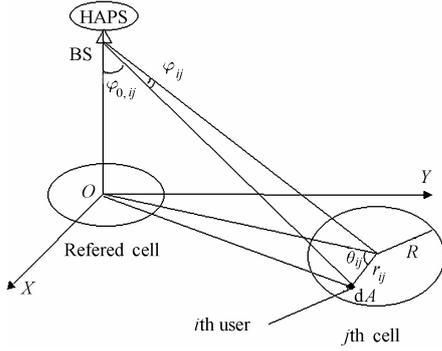


图 3 HAPS 区间干扰几何关系

Fig.3 Geometrical relationship of HAPS' interfere

示增益。根据文献[9], 来自 N 个邻近小区用户的同信道干扰, 即区间干扰功率可以通过式(6)近似得到。

$$I_{OC} = \alpha P \sum_{j=1}^N \int_A \frac{G(\varphi_{0,ij})}{G(\varphi_{ij})} \rho dA$$

$$= \alpha P \sum_{j=1}^N \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{G(\varphi_{0,ij})}{G(\varphi_{ij})} \rho r_{ij} dr_{ij} d\theta_{ij} \quad (6)$$

假设微波束覆盖区域用户数目及中心小区总的用户数目分别为 N_{mic} 及 N_t , 则

$$N_{mic} = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{mic}} \rho(r) \cdot r dr d\theta \quad (7)$$

$$N_t = \int_0^{2\pi} \int_0^R \rho(r) \cdot r dr d\theta \quad (8)$$

中心小区外围波束用户数:

$$N_{mac} = N_t - N_{mic} \quad (9)$$

而来自与接入用户处于同一小区的同信道干扰, 即区内干扰可简单表示为

$$I_{SC} = \alpha(N_t - 1)P \quad (10)$$

将 2.2 节所述实际用户分布代入以上各式, 并定义微波束覆盖区域用户数与宏波束覆盖区域用户数的比:

$$k = \frac{N_{mic}}{N_t} \quad (11)$$

假设宏波束和微波束用户到达 HAPS 接收功率分别为 P_{mac} , P_{mic} , 定义两层波束的功率比:

$$\lambda = \frac{P_{mic}}{P_{mac}} \quad (12)$$

令

$$f_1 = \sum_{j=1}^6 \iint_{S_j} \frac{G_{mic}(r, \theta) N_{neigh}}{G_j(r, \theta) \pi R^2} r dr d\theta \quad (13)$$

$$f_2 = \iint_{S_{mic}} \frac{G_{mic}(r, \theta)}{G_{mac}(r, \theta)} \rho(r) r dr d\theta \quad (14)$$

嵌入波束用户的 SIR 可表示为

$$SIR_{mic} = \frac{P_{mic}}{\alpha \cdot (N_{mic} - 1) \cdot P_{mic} + \alpha \cdot P_{mac} \cdot f_1 + \alpha \cdot P_{mac} \cdot f_2}$$

$$= \frac{1}{\alpha \cdot (k \cdot N_t - 1) + \alpha \cdot (1/\lambda) \cdot f_1 + \alpha \cdot (1/\lambda) \cdot f_2} \quad (15)$$

式(15)中分母的第 1 项表示微波束用户的区内干扰, 第 2 项表示邻近的 6 个小区宏波束用户对微波束用户的干扰, 而第 3 项则表示中心小区宏波束用户对微波束用户产生的干扰。同理, 令

$$f_3 = \sum_{j=1}^6 \iint_{S_j} \frac{G_{mac}(r, \theta) N_{neigh}}{G_j(r, \theta) \pi R^2} r dr d\theta \quad (16)$$

$$f_4 = \iint_{S_{mic}} \frac{G_{mac}(r, \theta)}{G_{mic}(r, \theta)} \rho(r) r dr d\theta \quad (17)$$

则中心小区宏波束用户的 SIR 可表示为

$$SIR_{mac} = \frac{P_{mac}}{\alpha \cdot (N_{mac} - 1) \cdot P_{mac} + \alpha \cdot P_{mac} \cdot f_3 + \alpha \cdot P_{mic} \cdot f_4}$$

$$= \frac{1}{\alpha \cdot [(1-k) \cdot N_t - 1] + \alpha \cdot f_3 + \alpha \cdot \lambda \cdot f_4} \quad (18)$$

SIR_{mic} , SIR_{mac} 必须同时满足:

$$SIR_{mic} \geq SIR_{req} \quad (19)$$

$$SIR_{mac} \geq SIR_{req} \quad (20)$$

其中 SIR_{req} 表示为保证 CDMA 通信质量而设置的信干比最低门限值。由于 SIR_{mic} , SIR_{mac} 都为功率比 λ 的函数, 且分别随 λ 的变化单调递增和递减。且由于系统容量必须同时满足式(19)、式(20), 显然, 令 $SIR_{mic} = SIR_{mac}$ 时可得式(21), 最优功率比 $\lambda_{opt}(k)$ 可从式(21)舍去负根得到, 它是 k 的函数。

$$f_4 \cdot \lambda^2 + [(1-2k) \cdot N_t + f_3] \cdot \lambda - (f_1 + f_2) = 0 \quad (21)$$

根据嵌入波束覆盖方案的特点, 用户比 k 可以通过调整微波束的大小来控制。因此, 通过调整 k 将功率比 λ 保持在最优值 λ_{opt} , 分别将最优值 $\lambda_{opt}(k)$ 代回至式(15), 式(18)即得最佳信噪比。所以通过最优功率比控制所得的系统容量是 k 的函数。逐步增大 N_{neigh} , 记录最佳信噪比满足式(19)、式(20)条件时的用户数目即为最大系统容量。相关内容将在第 3 节给出。

3 仿真结果

选择旁瓣电平为 -30dB , 其他参数: $SIR_{req} = 7\text{dB}$, $\alpha = 0.375$ 。图 4 给出了在中心小区总的用户数目不变的情况下, 用户分布参数取值不同时的 3 种状态。图 5 比较了在扩频增益 $G_p = 480(\text{UMTS})$ 时图 4 所列举的 3 种不同参数取值下 EBS 中经过最佳功率比控制后的系统容量随用户比 k 变化的情况。图 7(a)和图 7(b)分别比较了在扩频增益分别为 $G_p = 128(\text{IS-95})$, $G_p = 480(\text{UMTS})$ 时图 6 所列举的 3 种不同参数取值下 EBS 中经过最佳功率比控制后的系统容量随用户

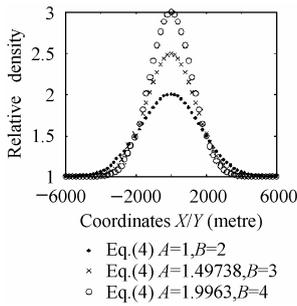


图4 中心小区用户分布
Fig.4. User distribution of center cell

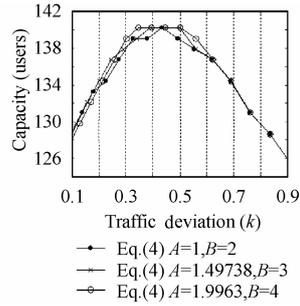


图5 嵌入波束结构系统容量随k变化图
Fig.5 Capacity vs. k of embedded beams

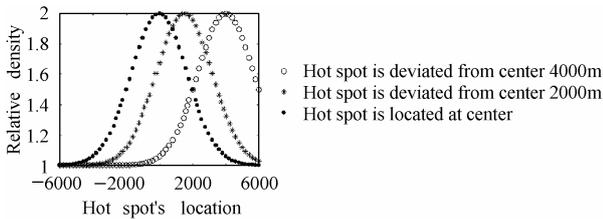


图6 中心小区用户分布
Fig.6 User distribution of center cell

比k变化的情况(图6中相对密度参数 $A=1, B=2$, 偏离位置在图中注明)。注意嵌入微波束的大小和位置是可调的, 这种波束结构具有如下两个优点:

第一, 不论用户分布如何, EBS的系统容量总能保持在最大值。这是因为通过调整微波束的大小, k总能保持在最优值。从图5及图7(a), 图7(b)可见, 无论用户分布参数如何, 当微波束覆盖区域内的用户数量占整个参考区域总用户数量的45%(即 $k=0.45$)左右时, EBS的系统容量达到最大值。因此, 通过调整微波束尺寸使 $k=0.45$ 可以将系统容量保持在最优值。

第二, 热点可能发生在平流层通信系统覆盖范围的任何地方, 例如剧院、集会、运动会等。而文献^[3]和^[4]所提出的传统波束覆盖方案是固定的, 没有考虑特定区域通信量高峰的发生。本文所提出的EBS结构微波束的位置是可调的, 根据用户分布情况, HAPS可以把微波束投射在覆盖范围内的任何地方。这种特点与陆地CDMA系统中固定的宏蜂窝/微蜂窝结构相比具有显著优势。本文模拟了热点偏离小区中心时, EBS结构通过调整微波束的位置缓解热点问题。从图7(a)和图7(b)可见, 通过调整微波束尺寸使 $k=0.45$ 左右仍可以将系统容量保持在最优值。另外, 在图7(a)和图7(b)中, 随热点偏离小区中心越远, 中心小区系统总容量有所下降, 这是因为当热点偏离小区中心甚至接近小区边界时, 由于微波束的大小不能超过宏波束导致了微波束尺寸调节的限制, 为了调整微波束尺寸使 $k=0.45$ 或更大, 本文以系统容量的微小降低为代价, 采用了使微波束中心并不正对热点中心的方法, 如图8所示, 这样就达到了可以任意调节微波束尺寸

的目的。

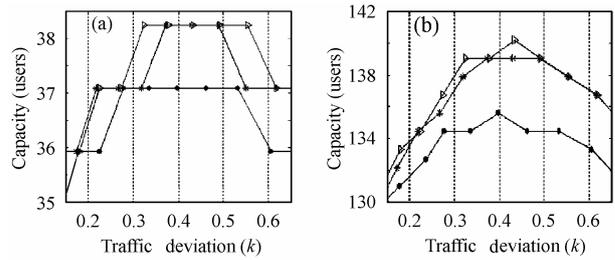


图7(a) $G_p=128$ (IS-95)系统容量随k变化图
图7(b) $G_p=480$ (UMTS)系统容量随k变化图
Fig.7 (a) $G_p=128$ (IS-95) Capacity vs. k
(b) $G_p=480$ (UMTS) Capacity vs. k

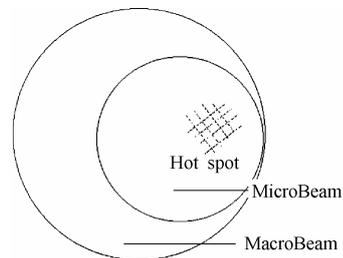


图8 热点区域偏离嵌入波束中心
Fig.8 Hot spot is deviated from center of embedded beam

4 结束语

本文在文献[5]所提出的HAPS多波束天线结构: 嵌入式波束结构的基础上, 继承该结构的优点, 改善原有结构模型过于简单, 仿真所用天线方向图及采用方法不符合实际应用的缺点, 使用新的更为复杂的更贴近于实际的模型及计算方法, 通过仿真得到了最优功率比控制表达式和最佳用户比值。仿真结果进一步表明使用该嵌入式结构可以缓解热点问题, 保持热点地区容量的稳定高效。

参考文献

- [1] Tong Z, Wu Y, Zhu H, Fu G, Jin R. Feasibility study of stratospheric platform and information systems in China, 2000 Stratospheric Platform System Workshop[C]. Tokyo, Japan, 2000: 60-68.
- [2] Niu Z, Jin R, Liu S, Fu G, Wu Y, Tong Z. R&D progress on stratospheric communication systems in China, 2003 Stratospheric Platform System Workshop[C]. Tokyo, Japan, 2003: 99-107.
- [3] ITU-R Doc. Recommendation ITU-RF.1569, Technical and operational characteristics for the fixed service using high altitude platform stations in the bands 27.5-28.35 GHz and 31-31.3 GHz, ITU-R Doc. 9BL/25, May 2002.
- [4] Ryu Nitura, Masayuki Oodo, Yoshihiro Hase, Takayuki Inaba, Tejiro Sakamoto, Mikio Suzuki. Digital beamforming array antenna on-board stratospheric platform for quick response SDMA in the band 31/28 GHz, International Symposium on

- Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'01)[C], Sep. 2001.
- [5] Cheng Yuebo, Jin Ronghong, Jiang Ran, Liu Bo. Hot spot relief with embedded beam for CDMA systems in HAPS, *Journal of Electronics & Information Technology, Journal of Electronics (China)*, 2006, 23(2): 172-175.
- [6] Joseph Shapira. Microcell engineering in CDMA cellular networks[J], *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 1994, 43(4): 817 - 825.
- [7] Kim D H, Lee D D, Kim H J, Whang K C. Capacity analysis of macro/microcell CDMA with power ratio control and tilted antenna[J]. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2000, 49(1): 34 - 42.
- [8] Thornton J, Grace D. Optimizing an array of antennas for cellular coverage from a high altitude platform[J]. *IEEE Tran. on Wireless Communications*, 2003, 2(3): 484 - 492.
- [9] Foo Y C, Lim W L, Tafazolli R, Barclay L. Other-cell interference and reverse link capacity of high altitude platform station CDMA system[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(22): 1881 - 1882.
- 程月波: 女, 1975年生, 硕士生, 从事智能天线和电磁计算等方面的研究工作. E-mail:chengyueb@163.com
- 金荣洪: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要从事现代通信天线理论和设计、数字波束形成技术、多波束天线、数值分析等领域的研究工作.
- 刘波: 男, 1978年生, 博士生, 智能天线和电磁计算等方面的研究工作.
- 耿军平: 男, 1972年生, 博士后, 现在从事智能天线和电磁兼容等方面的研究工作.