

文章编号:1007-5321(2014)02-0048-05

DOI:10.13190/j.jbupt.2014.02.011

HAPS 通信多层环形小区结构设计

管明祥¹, 王 乐¹, 郭 庆²

(1. 深圳信息职业技术学院 电子与通信学院, 深圳 518172; 2. 哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 通过采取增大内圈波束宽度和减小外圈波束宽度的方法,设计了一种新颖的高空平台站通信多层环形小区结构,该结构能缩小内外小区链路信噪比的差值,抑制波束间干扰.通过合理的波束分配、理论分析、示例、小区链路计算,验证了多层环形小区结构设计方案的正确性.该设计能降低天线设计和实现难度,降低成本,便于工程实现.

关 键 词: 高空平台站; 小区结构; 波束成形; 多层

中图分类号: TN911.22

文献标志码: A

Multi-Layer Ring Cellular Structure for HAPS Communication

GUAN Ming-xiang¹, WANG Le¹, GUO Qing²

(1. School of Electronic and Communication, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518172, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A new multi-layer ring cellular structure for HAPS communication is constructed. The proposed cell structure will increase the width of the beam at the inner circle, reduce the width of the beam at the outer circle, and decrease the difference of signal to noise ratio between the inner and outer cells. The validity of ring cellular structure is verified by analysis and numerical calculation of wireless link budget. Also the complexity of the antenna design for engineering realization and cost are reduced by multi-layer ring cellular structure designed this paper.

Key words: high altitude platform stations; cellular structure; beam forming; multi-layer

高空平台站通信(HAPS, high altitude platform stations)在近地空间范围内使用通信平台作为微波中继站,与地面控制设备、入口设备以及多种无线用户构成通信系统^[1-2].高空平台(HAP, high altitude platform)既可以与卫星地面综合组网,也可以单独与地面组网.在一个高空平台覆盖范围内,仍然可以采用蜂窝网结构组织通信^[3].

通过使用多波束天线对覆盖区域进行分区覆盖,实现了码分多址(CDMA, code division multiple

access)和空分多址(SDMA, space division multiple access)混合多址接入技术,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.无疑天线技术、小区结构、链路特性等都是高空平台站通信系统的关键技术,因而对于无线通信系统的链路设计来说,研究以上关键技术具有非常重要的意义^[4-5].文献[6-7]中借鉴地面蜂窝系统的分划方法,将覆盖区域分成数个大小相等的等边六边形,通过调整天线波束的形状对每个蜂窝进行覆盖,这种分划的

收稿日期:2013-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(61040004);广东省高等学校优秀青年教师培养计划资助项目(Yq2013192);广东省自然科学基金项目(S2011010006111, S2012040007242);深圳市科技创新委员会资助项目(JCYJ20130401095947215);深圳信息职业技术学院重点实验室建设项目(SYS201004)

作者简介: 管明祥(1979—),男,副教授,博士, E-mail: gmx2020@126.com; 郭 庆(1964—),男,教授,博士生导师.

优点是每个小区的大小相等,便于管理,但天线波束成型较难,容易形成波束间干扰. 上海交通大学的程月波等人提出了一种基于天线分集的天线收发模型,以改善 HAPS 通信数据链路性能^[8],但没有考虑波束成形及小区结构问题. 文献[9]提出了椭圆小区设计方案,但这种分划要求的天线简单,外圈的单波束覆盖范围比内圈大很多,覆盖范围过大可能导致信道容量不足. 因此,提出一种新颖的 HAPS 通信多层环形小区结构,以满足 HAPS 的通信需求.

1 已有方案

目前常见的有2种小区的划分方法,第1种称为蜂窝小区结构,如图1所示.

第2种为椭圆小区结构^[7],通过固定天线波束大小,以椭圆形状的形式覆盖,如图2所示. 这种结构要求的天线简单,但外圈的单波束覆盖范围比内圈大很多,覆盖范围过大,可能导致信道容量不足.

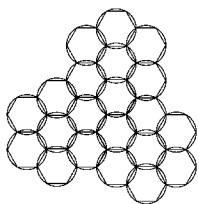


图1 蜂窝小区覆盖

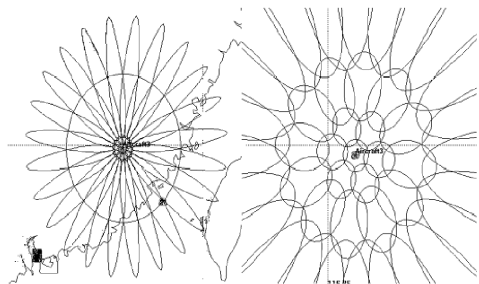


图2 椭圆小区覆盖

2 多层环形小区结构设计

新颖的多层环形小区设计采用了多波束阵列天线来代替传统的蜂窝小区,该设计思想主要将内圈波束适当增大,外圈波束适当减小,波束大小的选择需要根据容量、天线数目、波束成型难度等参数进行优化,在保证波束数即小区数目的同时,增加了平台频谱的空分复用度,即提高了系统容量,如图3所示.

在传统的正六边形小区覆盖中,区域覆盖的改变需要同时调整6个小区,而多层环形小区覆盖方

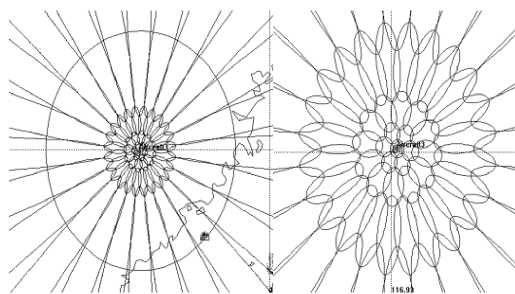


图3 多层环形小区结构

案中,当区域覆盖改变时,只需要调整相邻两个小区. 一般来说,为了保证服务质量,小区的用户数和业务量是固定的. 但对于业务热点区域或负载不均衡区域,由于某些地方用户数过多而有些地方用户数偏少,可以考虑通过调整小区覆盖面积来适应小区用户数或业务量的变化.

为分析单个小区特性,假设平台高度为 h km,点波束方向角为 (θ_0, ϕ_0) . 将考虑传统的波束成形方法即采用二维相位阵列天线方式(见文献[10])形成波束在 ϕ_0 平面及与之垂直的 θ_0 平面的半波束,带宽分别为 W_ϕ 及 W_θ . 每个环形小区分别由内环半径 r_1 、中心半径 r 及外环半径 r_2 决定,环形小区宽度为 w_r ,可以得到半波束带宽分别为

$$W_\theta = \frac{1}{\cos \theta_0 \sqrt{\theta_{x0}^{-2} \cos^2 \phi_0 + \theta_{y0}^{-2} \sin^2 \phi_0}} \quad (1)$$

$$W_\phi = \frac{1}{\sqrt{\theta_{x0}^{-2} \sin^2 \phi_0 + \theta_{y0}^{-2} \cos^2 \phi_0}} \quad (2)$$

θ_{x0}, θ_{y0} 分别为 $M \times N$ 维天线阵列的一维波束带宽,大小为

$$\theta_{x0} = \sin^{-1} \left(\sin \theta_0 + \frac{0.443\lambda}{Md_x} \right) - \sin^{-1} \left(\sin \theta_0 - \frac{0.443\lambda}{Md_x} \right) \quad (3)$$

$$\theta_{y0} = \sin^{-1} \left(\sin \theta_0 + \frac{0.443\lambda}{Nd_y} \right) - \sin^{-1} \left(\sin \theta_0 - \frac{0.443\lambda}{Nd_y} \right) \quad (4)$$

从式(1)~(4)可以看出, x 轴及 y 轴方向的 $M \times N$ 维天线阵列大小决定了天线的波束带宽,很显然,当 M, N 不相等时,天线波束大小将随着方位角 ϕ_0 变化,即环形小区宽度也将发生变化,这必然导致环形小区大小不一致. 为了保持每个环形小区大小一致,笔者考虑平台天线为 $M = N$ 的方阵列. 为了分析简单,设定 $d_x = d_y = 0.5\lambda$, 式(1)~式(4)

可以写成

$$W_\theta = \sec \theta_0 \theta_{x0} \quad (5)$$

$$W_\phi = \theta_{x0} \quad (6)$$

$$\theta_x = \theta_y = \sin^{-1} \left(\sin \theta_0 + \frac{0.886}{N} \right) - \sin^{-1} \left(\sin \theta_0 - \frac{0.886}{N} \right) \quad (7)$$

环形小区宽度可以表示为

$$w_r = 2h \left(\frac{\tan \left(\frac{W_\theta}{2} \right)}{\cos^2 \theta_0 - \sin^2 \theta_0 \tan^2 \left(\frac{W_\theta}{2} \right)} \right) \quad (8)$$

图4给出平台高度为20 km时天线俯角 θ_0 与环形小区宽度 w_r 的关系。

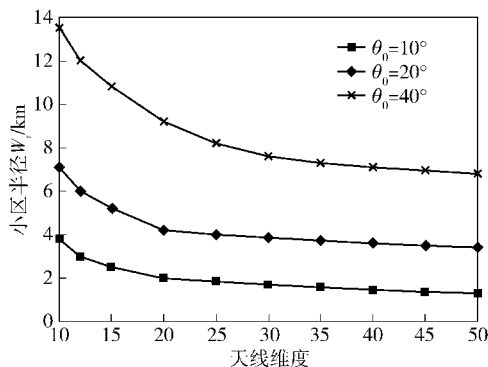


图4 不同天线俯角 θ_0 下天线维度与环形小区宽度关系

w_r 随着俯角 θ_0 的增加(仰角减小)而增加,随着天线阵列维数的增加而减小。因此,为了减轻在低仰角时环形小区过宽而导致通信性能下降,采用了多维度阵列天线(增大 N 值),并考虑环形小区的另外一个参量为环形小区的面积 A_r , A_r 可以表示为

$$A_r = 4\pi h^2 \left(\frac{\tan \theta_0 \tan \left(\frac{W_\theta}{2} \right)}{\cos^2 \theta_0 - \sin^2 \theta_0 \tan^2 \left(\frac{W_\theta}{2} \right)} \right) \quad (9)$$

从图5中可以看出,环形小区的面积随着俯角 θ_0 的增加而增加,随着天线阵列维度(N 值)的增加而减小。

3 多层环形小区设计示例比较分析

在文献[7]中,传统蜂窝小区与椭圆小区方案的链路载噪比特性存在较大差异。蜂窝小区方案的覆盖地区中心点和边缘的载噪比相差不大,约为3 dB,加上小区大小相等,适用于业务量分布较平均的应用。而椭圆小区方案的覆盖地区中心点和边缘

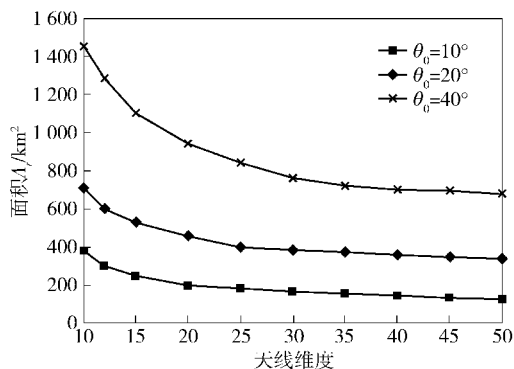


图5 不同天线俯角 θ_0 下天线维度与环形小区面积的关系

载噪比相差较大,约为16 dB,且椭圆小区方案的小区分布也是中心密集,外圈则每个小区覆盖面积较大,适用于中心业务量大、外圈业务量小的地区,如中心城市外部乡村的应用。同时考虑小区半径对链路载噪比的影响。随着小区半径变小,HAP天线增益变大,因此上行链路载噪比提高。但受系统总功率限制,HAP单波束发射功率变小,因此下行链路载噪比下降。

椭圆小区方案相比蜂窝小区方案存在信噪比分布不均匀和覆盖面积相差悬殊的不足。但蜂窝小区同样存在问题,要使天线波束按照蜂窝小区的划分进行覆盖,要求天线波束成椭圆形,仰角越小时,曲率越大,这对天线的制造技术要求很高,极大地提高了成本。因此考虑采用改进的椭圆小区方案,增大内圈波束宽度,减小外圈波束宽度,尽量缩小内外小区链路信噪比的差值,同时增大了内圈小区的面积,缩小外圈小区的面积。同时考虑通过合理分配波束,减少小区的数目,既满足覆盖链路质量要求,也适当考虑天线波束成形难度。

示例1 单平台5°仰角的4层环形小区示例,波束分布如图6所示。

天线波束分布表达式为

$$_1(1_{40}) + _2(9_{20}) + _3(18_7) + _4(27_5) = 55 \quad (10)$$

其中,前下角标表示环编号,后下角标表示波束的半波束宽度,中间数字表示波束数。如 $_1(1_{40})$ 表示第1环(中间环)有1个波束,半波束宽度为40°。该方案中心采用半波束宽度为40°的宽波束覆盖,因为通信距离短,仰角高,信道较好,可以满足通信需要,边缘地区采用半波束宽度为5°的波束,尽量提高天线增益,弥补通信距离长和低仰角的影响。

示例2 单平台10°仰角的3层环形小区。

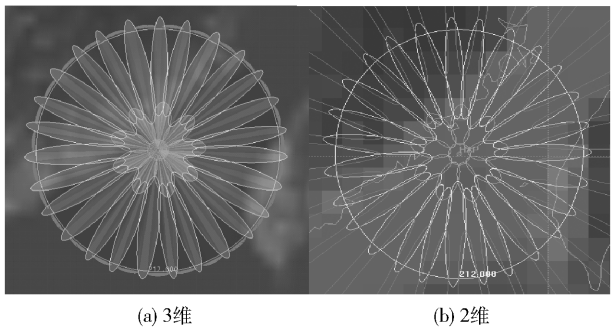


图 6 单平台 5°仰角 4 层环形小区波形示意图(55 波束)

考虑到现有技术的水平,必须减少波束的数目,这样只能增大天线波束宽度,以减小天线增益的代价,换取单波束覆盖范围的增大. 因此,示例 1 中的 4 层环形小区减少为 3 层环形小区,同时考虑波束投影的拓扑结构,设计采用 $1+n+3n$ 的方案. 即内环采用 1 个大波束覆盖,沿用示例 1 中的半波束宽度为 40° 的波束;中环采用 20° 左右的 n 个波束覆盖;外环采用 10° 的 $3n$ 个窄波束覆盖,其中填补中环缝隙的波束较宽,其他的较窄.

综合波束数和要求的天线增益,较合适的 n 取值为 6、7 和 8,分别需要 25、29 和 33 个波束. 其中 n 为 8 时,天线增益较大,信道质量较好.

$$_1(1_{40})+_2(8_{20})+_3(24_{10})=33 \quad (11)$$

图 7 为 $n=8$ 时 33 波束的环形小区示意图. 为了验证笔者提出的多层环形小区设计的正确性,特别将 2 种设计示例小区边缘的链路质量作对

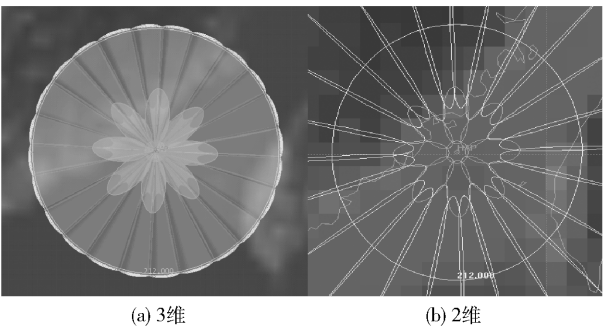


图 7 单平台 10°仰角 3 层环形小区波形示意图(33 波束)

比(2 种设计示例中小区中心链路质量相同). 表 1、表 2 为系统参数,表 3、表 4 中上下行链路质量对比结果可由文献[7]求得. G/T 表示接收系统的品质因数,它是接近天线增益 G 与接收系统噪声温度 T 之比值.

表 1 用户终端系统参数

示例	G/T (dB·K ⁻¹)	天线 功率/ W	天线 效率	指向 损耗/ dB	通信 速率/ (Mbit·s ⁻¹)	噪声 带宽/ dBHz	最远 通信 距离/km
1	-20	1	0.7	1	5	66	212
2	-20	1	0.7	1	5	66	120

表 2 平台系统参数

示例	天线 功率/W	天线 口径/m	天线 增益/dB	天线半波 束宽/(°)	G/T (dB·K ⁻¹)
1	1	1.6	31.6	5	10
2	1	0.82	25.6	10	5

表 3 上行链路质量比较

示例	通信频率/GHz	自由空间损耗/dB	载噪比/dB	$(E_b/N_0)/dB$	(E_b/N_0) 余量/dB	有效 $(E_b/N_0)/dB$	误码率
1	2.65	155.4	16.2	15.2	5.6	9.6	$<10^{-5}$
2	2.65	147.4	19.2	18.2	8.6	9.6	$<10^{-5}$

表 4 下行链路质量比较

示例	通信频率/GHz	自由空间损耗/dB	载噪比/dB	$(E_b/N_0)/dB$	(E_b/N_0) 余量/dB	有效 $(E_b/N_0)/dB$	误码率
1	2.5	154.9	18.3	17.3	7.7	9.6	$<10^{-5}$
2	2.5	146.9	20.3	19.3	9.7	9.6	$<10^{-5}$

由表 1、表 2 所示的数据可知,链路满足通信要求的信噪比,也留有一定的余量,但对平台和用户终端的天线要求有较高的功率和 G/T 值.

从表 3、表 4 中各个链路的上行、下行链路特性可以发现,相对于上行链路信噪比的紧张,下行链路具有较大的余量. 3 环覆盖方案虽然满足了天线波束数的限制(35 个以下),但是在减少波束数即小区

数目的同时,也减少了平台频谱的空分复用度,即减少了系统容量,这也是 HAPS 通信规划设计必须考虑的问题.

4 结束语

重点分析了 HAPS 通信多波束小区划分,设计了一种新颖的 HAPS 通信多层环形小区结构,该结

构有效规避波束间干扰,小区信道容量满足系统需求,而且天线波束成型难度较小,降低实现成本.通过理论分析及示例计算,验证了多层环形小区结构设计方案的正确性.

参考文献:

- [1] Tozer T, Smith A. High altitude platforms and milsatcom for future capacity requirements[C]//Milsatcoms 2010, IET Seminar on. London: [s. n.], 2010: 1-26.
- [2] Liu Yiming, Grace D, Mitchell P D. Exploiting platform diversity for GoS improvement for users with different high altitude platform availability[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(1): 196-203.
- [3] Jeng-Ji H, Wang Weiting, Yi-Hsuan C, et al. Interference reduction for terrestrial cellular CDMA systems via high altitude platform station[C]//Vehicular Technology Conference, 2007. Dublin: VTC2007-Spring, 2007: 1350-1354.
- [4] Li Shufeng, Grace D, Liu Yanchen, et al. Overlap area assisted call admission control scheme for communications system[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4): 2911-2920.
- [5] Anastasopoulos M P, Cottis P G. High altitude platform networks: a feedback suppression algorithm for reliable multicast/broadcast services[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(4): 1639-1643.
- [6] Karapantazis S, Pavlidou F N. The role of high altitude platforms in beyond 3G networks[J]. Wireless Communications, IEEE, 2005, 12(6): 33-41.
- [7] 管明祥, 郭庆, 顾学迈. HAPS 通信覆盖及链路特性分析[J]. 电波科学学报, 2012, 27(4): 832-839.
Guan Mingxiang, Guo Qing, Gu Xuemai. Performance analysis of covering and wireless link characteristic for HAPS communication[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(4): 832-839.
- [8] 程月波, 金荣洪, 耿军平, 等. 平流层通信系统的收发链路性能研究[J]. 电波科学学报, 2005, 20(5): 666-670.
Cheng Yuebo, Jin Ronghong, Geng Junping, et al. Linkage performances for communication systems for HAPS[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(5): 666-670.
- [9] Guan Mingxiang, Yuan Fang, Guo Qing. Performance of coverage and wireless Link for HAPS communication[C]//Wireless Communications Signal Processing, 2009. Nanjing: [s. n.], 2009: 1-4.
- [10] Nofal M, Hadhood M, Dessouky M, et al. A novel cellular structure for stratospheric platform Mobile communications[C]//Radio Science Conference, 2002. Alexandria, Egypt: [s. n.], 2002: 354-362.