

龙伯透镜天线覆盖性能分析

Analysis of Coverage Performance of Luneburg Lens Antenna

任洪彬, 刘 亮, 高学科 (中讯邮电咨询设计院有限公司郑州分公司, 河南 郑州 450007)

Ren Hongbin, Liu Liang, Gao Xueke (China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd. Zhengzhou Branch, Zhengzhou 450007, China)

摘要:

目前5G技术的信道容量已很接近香农理论容量。随着5G网络的部署,如何提升5G网络容量、提升5G网络覆盖、降低5G网络成本成为值得研究的课题。分析了龙伯透镜天线的基本原理,以及龙伯透镜具有的多波束隔离度高、窄波束高增益等特点,并通过测试对比了其在容量提升和网络覆盖方面的效果。

关键词:

龙伯透镜天线; 信道容量; 多波束

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2025.01.008

文章编号: 1007-3043(2025)01-0043-04

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

At present, the channel capacity of 5G technology is very close to the theoretical capacity of Shannon's Law. With the deployment of 5G network, how to improve 5G network capacity, improve 5G network coverage, reduce 5G network cost has become a topic worthy of research. It analyzes the basic principle of the Longbo lens antenna, as well as the high multi beam isolation and narrow beam high gain characteristics of the Longbo lens, and compares its performance in capacity improvement and network coverage through testing.

Keywords:

Luneburg lens antenna; Channel capacity; Multiwave velocity

引用格式: 任洪彬, 刘亮, 高学科. 龙伯透镜天线覆盖性能分析[J]. 邮电设计技术, 2025(1): 43-46.

1 概述

5G升级的关键技术主要包括调制、编码、多址、天线等, 调制技术从3G到4G, 再到如今的5G, 基本以QAM调制为主; 编码方面, 此前的Turbo码充分逼近了香农在1948年所提出的信道容量, LDPC和Polar对效率的提升非常有限; 多址技术方面, 5G提出的NOMA相对于4G时代的多址技术OFDM的增益也提升不大。5G在调制、编码、多址关键技术并未实现革命性的提升, 天线技术的突破成为5G技术升级的一个方向,

龙伯透镜天线有先进理论基础, 是有可能带来技术革新的新技术, 已经具备实用化、商业化条件。

2 龙伯透镜天线

2.1 龙伯透镜天线原理

龙伯透镜也叫龙勃透镜, 它最早在1944年由德国数学家鲁道夫·卡尔·卢纳伯格提出, 但由于材料和加工精度的问题, 龙伯透镜在提出之后一直没有得到有效的实验验证。近年来随着工艺的逐步成熟、材料技术的完善和人工等效媒质理论的发展, 龙伯透镜天线的工程化实现已经取得了较为显著的进步。

龙伯透镜模型的一个重要前提, 就是球体从外到

收稿日期: 2024-11-28

内材料的介电常数是梯度变化的^[1],利用多层介质球体的折射特性,将单个天线单元的低增益、宽波束的电磁波信号汇聚到一个点上,汇集成高增益、窄波束的电磁波信号,提高天线的接收灵敏度和传输效率。

龙伯透镜可以将入射的特定波长的电磁波汇聚到球面上的某一个点,同样也可以将电磁波沿着原方向反射回去,接收时把平面波通过透镜层层折射后聚焦为一点,被馈源接收;发射时在透镜焦点置一馈源发射电磁波后,通过透镜折射后变成平面波(见图1)。

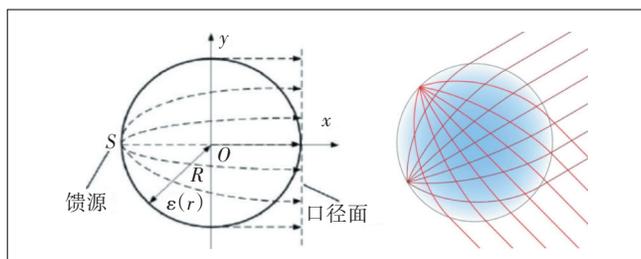


图1 龙伯透镜天线原理示意

2.2 龙伯透镜天线优势

龙伯透镜天线的电气性能优良,基本性能优越,它具备如下特点。

- 焦点、圆心、平面波方向在一条直线上(窄波束高增益)。
- 不同位置波束形状相同,更加容易实现多波束^[2]。
- 无极化特性,满足单极化、双极化 $\pm 45^\circ$ /HV、圆极化。
- 波束陡降,多波束时波束之间的干扰较小,交叠带窄,大容量场景扩容能力优秀。
- 所有波束的增益一致,垂直波宽约是板状天线的3~4倍^[3-4],覆盖更均匀,有效提升覆盖深度。

龙伯透镜天线特别适合用于高话务容量应用场景^[5]和超远距离覆盖应用场景。

a) 高话务容量应用场景。利用龙伯透镜天线端口隔离度高、多波束之间的干扰较小的特点,在原站址上进行扩容解决话务容量问题,相比传统的小区分裂/新增站址,可节约站点租金和维护费用,由于天线增益高,覆盖相同的区域可以降低RRU的功率,节约能耗。

b) 超远距离覆盖应用场景。基于窄波束高增益的特点^[6],龙伯透镜天线可用于大桥、高速公路、高铁、海域等超远距离覆盖,达到利用较少的基站达到较好

的覆盖效果,从而节约建设成本和维护成本。

3 龙伯透镜天线覆盖分析

3.1 高话务容量应用场景

3.1.1 高话务容量场景选择

某低层住宅区住户较多,目前周边有4个宏站对该住宅区进行覆盖,其中3个基站负荷较高,用户因为网络感知问题频繁投诉。

3.1.2 高话务容量场景替换方案

通过新增3个RRU(含License),将负荷最高的小区(A站-1)天线替换为龙伯透镜天线,将该扇区分裂为4个小区,做成单层4波束,以期缓解容量压力(见图2)。

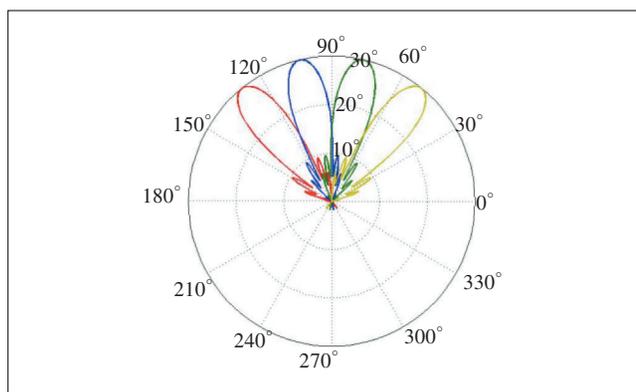


图2 高话务容量场景龙伯透镜天线替换方案

3.1.3 高话务容量场景替换效果

该区域4个基站的A站-1、B站-2、C站-3、D站-3扇区覆盖本试点住宅小区,A站-1替换前后一周的平均业务量提升87%,该区域整体日均业务量从替换前1 911 GB提升到2 306 GB。具体网络指标对比如表1所示。

从表1可以看出,通过龙伯透镜天线替换,有效降低了该区域4个基站的负荷,突破流量瓶颈,释放了潜在流量,吸热效果如下。

a) 日均流量。业务量大幅增加,替换后区域内日均流量增加395 GB。

b) 负荷情况。有效分担周边负荷,区域内基站负荷平均下降9.13%。

c) 用户数情况。有效吸收周边用户数,吸收周边基站用户108个。

d) 感知速率。用户感知有效提升,平均单用户感知速率提升4.71 Mbit/s。

表1 高话务容量区域各小区替换前后网络指标对比

小区	一周日均业务量/GB		区域负荷/%		区域用户数/个		感知速率/(Mbit/s)	
	替换前	替换后	替换前	替换后	替换前	替换后	替换前	替换后
A站-1(替换龙伯透镜天线)	565.6	1 058.9	83.58	80.92	348	456	16.70	19.16
B站-2	354.4	311.3	52.37	41.72	135	108	28.33	34.19
C站-3	491.2	456.9	72.59	54.71	198	183	23.22	25.94
D站-3	499.8	478.9	73.85	58.52	206	146	22.72	30.50

3.1.4 高话务容量场景替换效益分析

通常采用投资回收期方式对无线基站的建设效益进行分析,测算方法如下:假定投资年收入为A万元/年,建设投资为B万元,铁塔年租金为C万元/年,电费为D万元/年,运维成本为E万元/年,管理成本为F万元/年,人工成本为G万元/年,单站净收入 $H=(A-C-D-E-F-G)$ 万元/年,则投资回收期(年): $K=B/H$ 。

- 投资收入A,依据业务增收及流量单价计算。
- 建设投资B,依据建设设备费、工程服务等计算。
- 其他网运及管理成本,参考最近一年平均值计算。

本试点通过新增3个RRU,利用龙伯透镜天线的多波束之间的干扰较小的特点,来解决容量问题,基于上面测算方法结合平均网运及管理成本,投资回收期约为0.51年(见表2),经济效益良好。

3.2 超远距离覆盖应用场景

3.2.1 超远距离覆盖场景选择

超远距离覆盖场景主要提升覆盖性能,为了验证覆盖距离,建议选择比较直的路段。本文选择某高铁路段,站轨距在50~200 m,掠射角大于 10° 。

3.2.2 超远距离覆盖场景替换方案

表2 高话务容量场景替换投资回收期测算

类别	投资年收入A/(万元/年)	建设投资B/(万元)	铁塔年租金C/(万元/年)	电费D/(万元/年)	运维成本E/(万元/年)	管理成本F/(万元/年)	人工成本G/(万元/年)	投资回收期/年
数值	28.8	13.7	0.6	0.7	0.3	0.1	0.2	0.51

利用龙伯透镜天线高增益及多波束覆盖特性,能够实现超远覆盖。如图3所示,在选择的高铁路段,通过把站点A、站点C的常规板状天线替换为龙伯透镜天线,并暂时关闭B站点(仅关闭龙伯透镜天线替换制式的5G设备),测试替换前后覆盖性能情况,以期减少租金成本、降低能耗、提高网络资源利用率等,实现降本增效。

3.2.3 超远距离覆盖场景替换效果

替换前,站点A、站点B、站点C均在网,替换后,站点A-2、站点C-1扇区更换为龙伯透镜天线,中间站点B下电。具体测试结果如表3和表4所示。

从表3和表4可以看出,通过龙伯透镜天线的替换,在中间站点下电情况下,能够实现超越距离的覆盖,覆盖效果仍能得到保障。

- 下行RSRP:替换前平均RSRP为-94.20 dBm,替换后平均RSRP为-86.81 dBm,提升7.39 dBm。

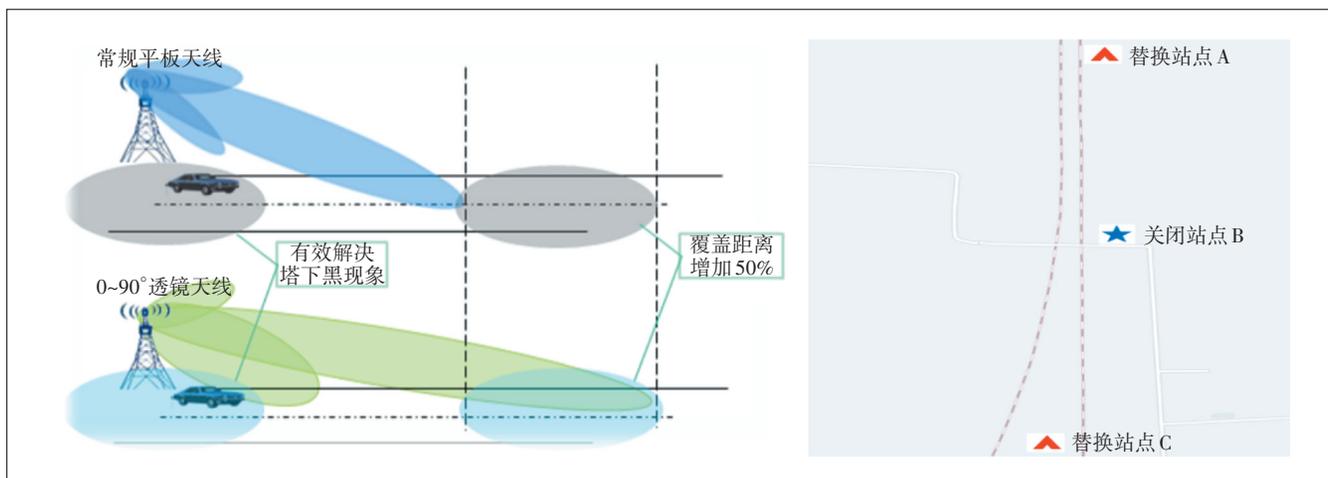


图3 超远距离覆盖场景龙伯透镜天线替换方案

表3 超远距离覆盖场景龙伯透镜天线替换前后RSRP对比

项目	替换前下行RSRP	替换前上行RSRP	替换后下行RSRP	替换后上行RSRP
RSRP平均值/dBm	-94.20	-90.95	-86.81	-83.93
RSRP最小值/dBm	-103.16	-101.34	-99.14	-94.98
RSRP最大值/dBm	-84.82	-70.55	-71.98	-74.33
RSRP≤-120%	0.00	0.00	0.00	0.00
-120<RSRP≤-110%	0.00	0.00	0.00	0.00
-110<RSRP≤-100%	16.67	7.50	0.00	0.00
-100<RSRP≤-90%	55.95	45.83	39.51	21.33
-90<RSRP≤-80%	27.38	24.17	34.57	48.00
-80<RSRP≤-70%	0.00	22.50	25.92	30.67
-70<RSRP/%	0.00	0.00	0.00	0.00

表4 超远距离覆盖场景龙伯透镜天线替换前后SINR对比

项目	替换前下行SINR	替换前上行SINR	替换后下行SINR	替换后上行SINR
SINR平均值/dB	16.00	20.96	22.77	24.79
SINR最小值/dB	7.34	10.43	12.03	10.73
SINR最大值/dB	24.24	30.98	30.69	33.07
SINR≤-5%	0.00	0.00	0.00	0.00
-5<SINR≤-3%	0.00	0.00	0.00	0.00
-3<SINR≤0%	0.00	0.00	0.00	0.00
0<SINR≤5%	0.00	0.00	0.00	0.00
5<SINR≤10%	4.76	0.00	0.00	0.00
10<SINR≤15%	42.86	28.34	6.17	10.67
15<SINR≤20%	33.33	13.33	20.99	10.66
20<SINR/%	19.05	58.33	72.84	78.67

b) 上行RSRP: 替换前平均RSRP为-90.95 dBm, 替换后平均RSRP为-83.93 dBm, 提升7.02 dBm。

c) 下行SINR: 替换前平均SINR为16.00 dB, 替换后平均SINR为22.77 dB, 提升6.77 dB。

d) 上行SINR: 替换前平均SINR为20.96 dB, 替换后平均SINR为24.79 dB, 提升3.83 dB。

3.2.4 超远距离覆盖场景替换效益分析

参考高话务容量应用场景效益分析方法, 本试点通过A站-2和C站-1共2个扇区替换为龙伯透镜天线, 利用龙伯透镜天线高增益特点, 在关闭中间B站点的情况下, 仍能保障覆盖效果, 从而节约一个基站的网运和管理成本, 等效投资回收期为2.53年。具体测算方法如表5所示。

4 结束语

龙伯透镜天线具有端口隔离度高、波束隔离度高、增益高等特性, 可有效解决容量和超远距离覆盖

表5 超远距离覆盖场景替换投资回收期测算

类别	投资年收入A/(万元/年)	建设投资B/(万元)	铁塔年租金C/(万元/年)	电费D/(万元/年)	运维E/(万元/年)	管理成本F/(万元/年)	人工成本G/(万元/年)	投资回收期/年
数值	0	4.8	-0.6	-0.7	-0.3	-0.1	-0.2	2.53

问题, 可以较好地提升网络指标和用户感知。但是龙伯透镜天线造价相对较高、对安装空间的需求较大, 同时往往伴随新增信源投资、网络重新优化等情况, 本试点经济效益分析并不具备普适性, 建议在如下场景考虑使用。

a) 高话务容量应用场景。在不新增站点情况下, 通过使用龙伯透镜天线可实现同扇区多小区(小区分裂), 能有效解决容量及深度覆盖问题, 开通后如果某个扇区拥塞, 可针对性再增加小区。

b) 超远距离覆盖应用场景。用于比较平直的道路、海域等超远距离覆盖, 能较好地保障覆盖效果, 需要结合现网基站网络制式情况、兼顾覆盖情况确定是否关闭中间站点。

c) 应急保障应用场景。在应急保障中, 使用龙伯透镜天线多波束隔离度高特性, 在有效控制干扰的情况下, 可有效提升容量和客户感知。

d) 场馆覆盖应用场景。在场馆覆盖场景, 少量龙伯透镜天线通常可实现多个传统天线的等效覆盖效果, 减少安装点, 降低工程维护成本。

参考文献:

- [1] 郑晓. 基于梯度龙伯透镜的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [2] 刘璟. 多波束龙伯透镜天线技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [3] 赵春雨. 超宽角扫描多波束透镜天线关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [4] 范炜煌. 人工电磁材料宽角扫描阵列天线的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [5] 李在勇, 雷振. 龙伯透镜天线在高容量场景的应用研究[J]. 中国新通信, 2021, 23(17): 101-102.
- [6] 费新. 小型化高增益对数周期偶极子天线研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

作者简介:

任洪彬, 高级工程师, 硕士, 主要从事移动通信工程规划、设计工作; 刘亮, 高级工程师, 学士, 主要从事移动通信工程规划、设计工作; 高学科, 高级工程师, 学士, 主要从事移动通信工程规划、设计工作。