



专题: 5G

5G 移动通信特殊成形基站天线设计

黄建军¹, 黄晓明²

- (1. 摩比天线技术(深圳)有限公司, 广东 深圳 518057;
2. 中国联合网络通信有限公司广东省分公司, 广东 广州 510630)

摘要: 针对 5G 大范围覆盖的应用场景进行了设计探讨, 提出通过对基站天线垂直面进行余割平方成形、以保证大范围覆盖应用场景下信号的均匀性的方法。首先通过算法推导, 证明余割平方成形的功率辐射波束可满足 5G 信号均匀覆盖的要求; 其次, 采用约束最优化方法, 把天线的方向性系数作为目标函数, 把指定区域的波束电平作为约束函数, 求解基站天线辐射单元的权值, 得到满足余割平方成形的辐射方向图。在 MATLAB 环境下开发了实现此算法的程序。本文的创新之处在于用实际的单元方向图和约束最优化方法, 在保证天线增益最优的前提下, 综合出需要线阵列天线方向图。引入仰角单元与其他正常单元一起综合方向图, 解决顶盲问题, 是这个方法的一个应用实例。最后, 仿真验证该方法, 并设置场景对应用余割平方成形的天线与常规天线的信号覆盖进行比较, 证明该方法对信号均匀性有极大的改善。

关键词: 等信号覆盖; 基站天线; 辐射功率方向图; 余割平方成形

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019186

Special antenna beamforming method for 5G mobile communication system

HUANG Jianjun¹, HUANG Xiaoming²

1. MOBI Antenna Technologies (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518057, China
2. Guangdong Branch of China United Network Communications Co., Ltd., Guangzhou 510630, China

Abstract: A method was researched to ensure the uniformity of RX signals in long-distance coverage for 5G applications. In this situation, the antenna pattern model was critical. Firstly, the cosecant-squared shaped beam pattern meets the requirement of uniform coverage through the derivation. Secondly, by constrained optimization algorithm, antenna directivity was taken as objective function, the beam level of specified range was taken as constraint function, to solve the weight parameter of the linear array elements, and the cosecant square pattern could be obtained. MATLAB program completed to realize the algorithm. The innovation was based on constrained optimization algorithm, the real elements patterns were imported, even elevation angle element was proposed in this solution to solve the top blind problem. Finally, the signal level coverage area was compared with which do not have beamforming, it has been shown that cosecant-squared beamforming model can improve the signal uniformity obviously.

Key words: coverage uniformity, base station antenna, radiation pattern, cosecant-squared pattern

收稿日期: 2019-06-16; 修回日期: 2019-07-02



1 引言

5G 是万物互联的时代,某些特殊场景下的移动通信将远超现有蜂窝网络的覆盖范畴,比如航空线路、无人机,需要地面向上有大角度的覆盖区域。对这些场景,人们希望基站范围尽可能大,覆盖距离数十甚至数百千米,覆盖近点和远点距离相差几十甚至上百倍,信号传播距离损耗差异数十分贝。为实现基站的大范围覆盖,使无线信号在目标覆盖区域内分布得尽量均匀、稳定,要求阵列天线具有余割平方的方向图,并且在非覆盖区,需要较低的副瓣电平。

在雷达系统中,经常采用反射面天线实现方向图余割平方成形^[1],但移动通信基站天线不宜采用反射面形式。基站天线一般采用辐射单元按一定间距排列的阵列天线,辐射单元少,增益较低,因此,无法精确实现余割平方成形。本文探讨了基站天线阵列的综合,通过调整馈入各辐射单元信号的相幅(权值),以实现方向图成形^[2],逼近余割平方曲线。

参考文献[3-6]给出了天线综合方向图的一些方法,尽管这些方法的算法效率高,但未考虑辐射单元本身的方向图特性,对于小间距大阵列天线,未考虑单元方向图,对所综合方向图影响不大。但移动通信基站类天线间距大,辐射单元少,单元方向图对综合方向图有明显影响,参考文献[3-6]所列方法不适用。本文所采用的方法为约束最优化方法。

2 设计方案

2.1 空间线路大范围覆盖对天线方向图的要求

考虑地面基站覆盖飞机航线的大范围覆盖典型场景如图 1 所示,天线辐射信号需要向上覆盖一段距离为 D 的航线,对应天线辐射角为 $0^\circ \sim \theta$ 。

天线采用多辐射单元按一定间距排列的垂直线性阵列,给各辐射单元不同的振幅和相位权值,可以实现对垂直方向图的成形。水平方向不涉及

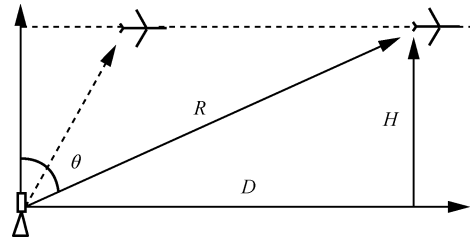


图 1 天线空间线路覆盖侧面示意图

垂直方向图成形,故本文不作讨论。

根据参考文献[7],航线上飞机接收的信号功率 P_r 为:

$$P_r = P_t G_t G_r(\theta) \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (1)$$

其中, P_t 为基站天线发射功率, $G_t(\theta)$ 为基站天线增益, G_r 为飞机上接收天线增益, R 为信号从基站到飞机的空间传播距离。

将 $R = \frac{H}{\cos \theta}$ 代入式 (1), 得:

$$G_t(\theta) = \frac{16\pi^2 H^2 P_r}{\lambda^2 P_t G_r} \csc^2 \theta = C \csc^2 \theta \quad (2)$$

其中, H 为飞机飞行高度 $C = \frac{16\pi^2 H^2 P_r}{\lambda^2 P_t G_r}$, P_t 、 P_r 、

G_r 和 λ 都是确定的,对保持一定高度 H 飞行的飞机, C 为常数。因此,如果要保持接收信号电平稳定(不变),则基站天线增益 $G_t(\theta)$ 与角度 θ 满足余割平方关系。对应距离为 D 的航段,天线辐射角 θ 为 $0^\circ \sim \tan^{-1} \frac{H}{D}$ ($\theta < 90^\circ$),在 $\theta \geq 90^\circ$ 方向,

天线辐射是有害的,需要尽量抑制。

2.2 天线阵列设计

线性阵列天线示意图如图 2 所示。线阵列合成方向图 $\tilde{F}_{\text{syn}}(\theta)$ 为辐射单元方向图与阵列因子的乘积:

$$\tilde{F}_{\text{syn}}(\theta) = \sum_{n=1}^N A_n \tilde{F}_n(\theta) e^{(j\varphi_n + jkz \sin \theta)} \quad (3)$$

其中, $\tilde{F}_n(\theta)$ 为第 n 个辐射单元的场强方向图复函数, A_n 为单元馈电幅度, φ_n 为相位, k 为波数。

考虑增益最大化对通信是有利的,而方向性系数与增益成正比,故将方向性系数作为最优化

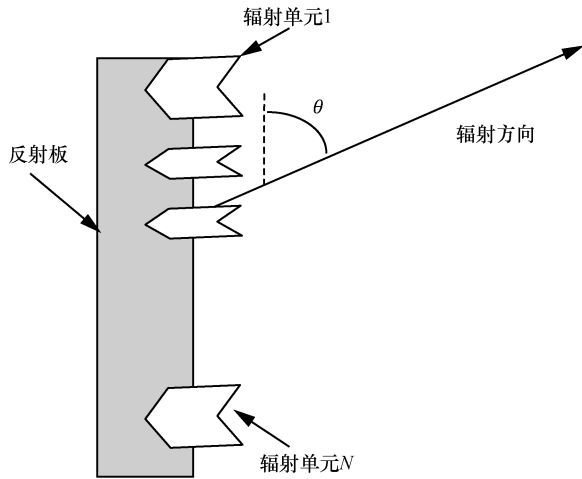


图2 线性阵列天线示意图

的目标函数。即优化目标函数为：

$$D_{\text{Objt}} = \frac{2}{\int_0^\pi F_{\text{syn}}^2(\theta) \sin \theta d\theta} \quad (4)$$

本文的目标是：天线的信号辐射在上半空间（ θ 为 $0^\circ \sim \tan^{-1} \frac{H}{D}$ ）场强方向图曲线符合余割曲线，下半空间和其他方向（ $\theta \geq \tan^{-1} \frac{H}{D}$ ）尽量抑制。因此，约束函数 $F_r(\theta)$ 为：

$$F_r(\theta) \begin{cases} = \csc \theta, \theta \in [0^\circ, \theta_{\text{Hpbw}} / 2] \\ < L_r, \theta \geq 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

其中， L_r 为约束电平， θ_{Hpbw} 为半功率波束宽度。

2.3 顶点补盲

由于线性阵列天线在辐射单元连线上信号辐射为 0，导致飞机在天线正上方没有信号，即所谓“顶盲”，为此，将最顶端的一个辐射单元向上仰 45° ，同时，反射板也折弯对应角度，解决“顶盲”问题。天线方向图阵列综合时，此单元按照实际的位置角度所具有的方向图参与了综合，因此所综合的方向符合实际情况。

3 设计验证

按照上述思路，用 MATLAB 编程语言，编写了综合方向图程序。程序中，辐射单元的幅度和相位作为自变量，程序可设置各自变量允许的变

化范围，使方向性系数最大的作为优化的目标函数。方向图的任意位置区间电平作为约束条件，约束条件可以大于、小于或等于指定值。可以设置多个约束条件。其单元方向图为矢量方向图，每个辐射单元有自己的独立方向图而非假定为单元方向图相同。单元方向图可以是实际测量的或者是仿真的。

为验证方法的有效性，在 HFSS 环境下建立了一个线阵列天线模型，仿真得到各辐射单元方向图，作为综合的单元方向图。综合过程如下。

3.1 仿真模型

图 3 为本设计方案在 HFSS 系统中建立的模型，由 1 块反射板和 10 个双极化振子辐射单元组成，每个辐射单元相同，线性排列，间距设为 0.8λ ，其中，最上面的辐射单元向上折 45° 。仿真并导出每个辐射单元的矢量方向图，

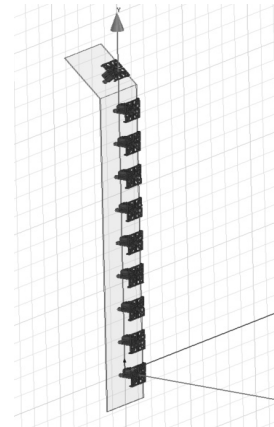


图3 单元线阵列仿真模型

3.2 辐射单元幅相求解

将第 3.1 节的 10 个仿真的单元方向图导入 MATLAB，上半空间按照每 1° 一个点，按照余割曲线计算出每个角度的值，让这个值等于方向图对应位置的电平作为约束条件。在下半空间，将约束电平 L_r 设置为 -25 dB ，让方向图在下半空间的电平小于这个电平作为约束条件。将幅度范围约束在 $0.25 \sim 1$ ，相位在 $-40 \sim 40^\circ$ 。综合结果见表 1。



表 1 各辐射单元馈电值（最上面的单元为单元 1）

馈电值	单元									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
幅度/V	0.430 6	0.617 0	0.770 4	0.915	1	1	0.908 7	0.711 0	0.460 7	0.25
相位	-33.2°	-39.88°	-11.33°	-2.44°	0°	-5.291°	-12.94°	-22.83°	-32.26°	-36.11°

3.3 结果对比分析

所综合的方向图如图 4 所示。作为对比，图 4 还包括未成形的常规方向图和余割曲线。可以看出，本设计方案天线的综合方向图曲线与标准余割曲线有很好的符合度，且下半区间的电平抑制在-25 dB 以下，可显著降低地面的干扰。常规等幅同相天线的方向性系数为 17.52 dB，本设计方案特殊成形天线方向性系数为 17.05 dB，降低约 0.5 dB，但在大角度覆盖区域，本设计方案实现了更好的等信号覆盖，该方向性系数可以从算法上保证是在满足成形条件下的最好结果。

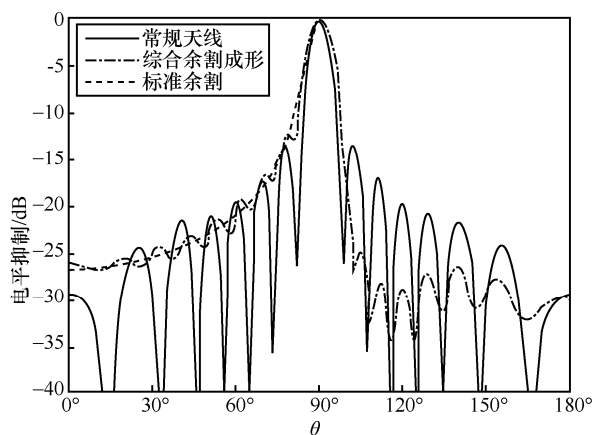


图 4 方向图曲线对比

3.4 空间线路覆盖效果

为了验证常规天线与成形天线在整个覆盖区域的接收电平的起伏情况。特做如下场景推演。

根据空间航线覆盖场景的实际情况，如下参数假设：

- $F=900$ MHz，即通信频率；
- $H=10$ km，即飞机飞行高度；
- $D=200$ km，即覆盖航段范围距离；

- $P_t=46$ dBm（40 W），即基站发射功率；
- $G_r=2$ dBi，即飞机上的接收天线增益；
- $G_t=21$ dBi，即基站天线最高增益（包含水平平面成形增益）。

利用式（1），可计算在航线飞机上接收的信号电平。图 5 给出了本设计方案特殊成形天线和常规等幅同相天线作为基站天线、从近到远（1~200 km）飞机上接收的信号电平曲线（未考虑水汽等损耗），由图 5 可知，本设计方案特殊成形天线覆盖信号的均匀性明显优于常规天线。

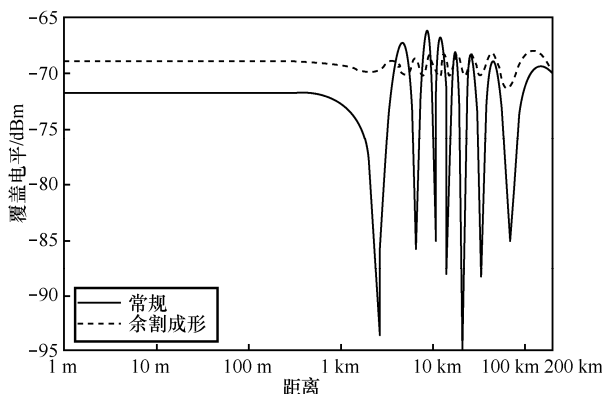


图 5 常规天线和特殊成形天线接收信号电平对比

4 结束语

本文通过编制软件，实现所设想的辐射方向图的综合方法，建模了一个天线实例，用仿真单元方向图综合出满足余割成形要求的方向图。尤其是可通过调整个别辐射单元形态，满足特殊要求，在辐射单元形态变化的条件下该方法仍能够适应，证明了方法的灵活性和适应性。事实上，通过设置不同的约束条件，该方法也可以综合出其他类型辐射图。因此，这个

方法可以解决多种5G应用场景下无缝覆盖所需要的天线的设计问题。

参考文献:

- [1] RUDGE A W. The handbook of antenna design [J]. Antennas & Propagation Society Newsletter IEEE, 1982, 25(5): 19-21.
- [2] 杨国军. 成形波束平面阵列天线的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
YANG G J. Study on planar array antenna of shaped-beam[D]. Xi'an: Xidian University, 2006.
- [3] ELLIOTT R S, STERN G J. A new technology for shaped beam synthesis of equispaced arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1984(32): 1129-1133.
- [4] STEYSKAL H. On antenna power pattern synthesis[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 1970, 18(1): 123-124.
- [5] ORCHARD H J, ELLIOTT R S, STERN G J. Optimizing the synthesis of shaped antenna patterns[J]. IEEE Proc. (London), 1984(1): 63-68.
- [6] BUCCI O M, D'ELIA G K, MAZZARELLA G, et al. Antenna pattern synthesis: a new general approach[J]. Proceedings

of the IEEE, 1994, 82(3): 358-371..

- [7] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
LIN C L. Antenna engineering manual[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2002.

[作者简介]



黄建军(1962—), 男, 摩比天线技术(深圳)有限公司首席专家、高级工程师, 主要研究方向为基站天线、天线测量。



黄晓明(1966—), 男, 中国联合网络通信有限公司广东省分公司教授级高级工程师, 主要研究方向为移动通信无线网络架构、无线干扰和天线射频技术等。