



专题:4G&5G

5G 大规模紧耦合阵列天线研究

高峰,和凯,宋智源,朱文涛,王丽芳,高鹏
(中国移动通信集团设计院有限公司 北京 100080)

摘要:介绍了 5G 移动通信技术的概念、背景、发展历程以及大规模阵列天线对于 5G 移动通信系统的重要性;详细阐述了二维、三维阵列天线的基本原理和相关理论;在此基础上,重点介绍了紧耦合阵列天线,其具有体积小、带宽大等技术优势,是 5G 大规模阵列天线研究的重要方向;详细阐述了紧耦合阵列天线的构成、设计方法和设计步骤,设计出了一种高性能 5×5 的紧耦合阵列天线。

关键词:5G;大规模阵列天线;紧耦合阵列天线

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015130

Research on Large Scale Antenna Arrays for 5G Mobile Communication Technology

Gao Feng, He Kai, Song Zhiyuan, Zhu Wentao, Wang Lifang, Gao Peng
(China Mobile Group Design Institute Co., Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: The basic conception, background and development of the fifth-generation (5G) mobile communication technology were described. As the key technology of 5G, the research of large scale antenna arrays attracts more and more attention. Thus the basic principle of two-dimensional and three-dimensional array antennas was presented. And on this basis, the tightly coupled phased arrays (TCPA) were introduced. Due to the good properties such as wide in band and small in size, this kind of arrays become a promising candidate for the 5G large scale array antennas. A high-performance 5×5 tightly coupled phased array was designed and simulated.

Key words: 5G, large scale antenna array, tightly coupled phased array

1 引言

移动通信经历了从 1G 模拟技术到 4G 长期演进 (LTE)技术的发展,已被世界上超过 2/3 的人使用,成为人们日常生活中不可或缺的一部分^[1]。自 2013 年 12 月 4 日工业和信息化部颁发 4G 牌照以来,4G 网络能力快速形成。2014 年,我国 4G 网络基本完成了 300 多个城市的覆盖,

4G 基站建设数量超过 70 万个,4G 用户数量快速增长,截至 2014 年底,中国移动通信集团公司的 4G 用户数量已经超过 8 000 万户,4G 网络部署相当于 3G 网络 6 年的规模,相当于 2G 网络 20 年的规模。2014 年建设的基站数量,占全球 4G 基站数量的 40%,占全球 TDD 4G 基站数量的 80%。

随着智能终端的普及和移动新业务需求的持续增长,至 2020 年,全球每年总移动业务量将超过 127 EB

收稿日期:2015-05-08;修回日期:2015-05-15

论文引用格式:高峰,和凯,宋智源等. 5G 大规模紧耦合阵列天线研究. 电信科学, 2015130

Gao F, He K, Song Z Y, et al. Research on large scale antenna arrays for 5G mobile communication technology. Telecommunications Science, 2015130

(1 EB=10⁹ GB), 能够支撑每秒百兆比特传输速率的 4G 移动通信系统很难满足 2020 年之后移动通信的应用需求, LTE 建设方兴未艾, 5G 移动通信技术已经开始被广泛地研究^[2,3]。

3GPP 业务需求 (SA1) 工作组于 2015 年 2 月立项研究 5G 业务需求, 无线接入网(RAN)工作组与 SA1 工作组将于 2015 年 9 月召开研讨会, 2016 年 3 月开始 5G 的标准化工作; NGMN (Next Generation Mobile Networks, 下一代移动网络) 已于 2015 年 3 月完成并发布 5G 白皮书, 阐明运营商的 5G 需求, 后续将细化需求与网络架构; 2015 年 6 月 ITU-R 将发布愿景建议书, 是定义 5G 愿景和关键能力的官方文件, 也是 5G 研究的基础性文档。国内的 IMT (International Mobile Telecommunication, 国际移动通信)-2020(5G) 推进组已发布 5G 需求白皮书和概念白皮书, 计划于 2015 年 5 月底发布技术白皮书。图 1 为 ITU 定义的移动宽带的三大发展方向。

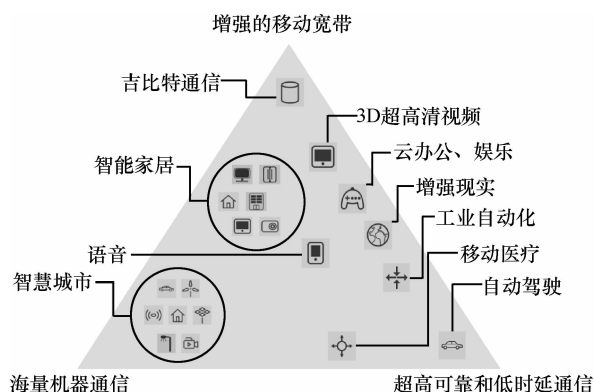


图 1 ITU 定义的应用场景

IMT-2020 目前定义了大规模天线、新型多址、高频段通信、超密集组网、新型网络架构、全双工、低时延高可靠通信、物联网等新技术。其中大规模天线技术、基于有源天线和 3D-MIMO 技术, 能够大幅度提升无线通信频谱效率和功率效率, 是支撑 5G 移动通信最具潜力的研究方向。

2 天线阵列的研究

大规模 MIMO 天线的基本特征是: 在同一时频资源上, 采用大规模阵列天线配置所提供的空间复用方式, 提升频谱资源的复用能力和各用户的频谱效率, 同时利用多 MIMO 天线的多天线分集和波束成形技术, 大幅度提升频谱资源的整体利用率, 提高传输速率。

2.1 传统天线阵列

传统天线阵列模型如图 2 所示。

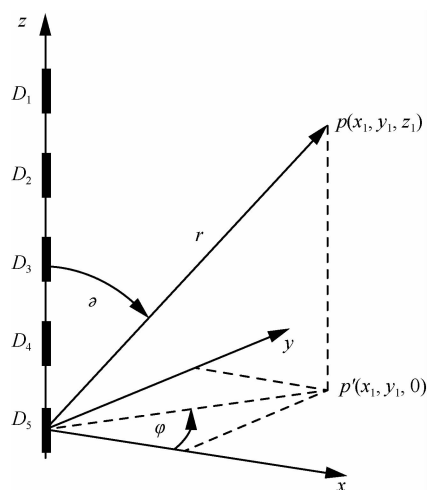


图 2 传统天线阵列模型

由图 2 可知, 由 n 个单元组成的阵列天线沿 z 轴均匀排列。根据电场的叠加原理, 阵列天线在远区的辐射场可表示为:

$$\begin{aligned} E_{\text{ges}}(\phi, \theta) &= \sum_{n=1}^N E_n(\phi, \theta) \\ &= \sum_{n=1}^N A_n \underline{C}_n(\phi, \theta) I_n \frac{\exp(-jkr_n)}{r_n} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\underline{C}_n(\phi, \theta)$ 表示阵列单元的方向图, I_n 是第 n 个阵元上的电流, r_n 是考察点和第 n 个阵元之间的距离, $k=2\pi/\lambda$ 为波数。

在远区场, 有如下近似:

$$|r_n| \approx |r_{n+1}| \quad (2)$$

令 $\phi=0, \underline{w}_n = I_n A_n$, 则天线的远场垂直面方向图 ($\phi=0$) 可表示为:

$$C_{\text{ges}}(\theta) = \frac{|E_{\text{ges}}(\theta)|}{|E_{\text{ges}}(\theta)|_{\max}} \bigg|_{r=\text{const}} \bigg|_{r \rightarrow \infty} \quad (3)$$

$$C_{\text{ges}}(\theta) = \frac{1}{C_{\text{ges}, \max}} \sum_{n=1}^N \underline{w}_n \underline{C}_n(\theta) \exp(-jkr_n) \quad (4)$$

远场条件下各阵元之间的相位差如图 3 所示。

在远场条件下, 各个阵元在考察点 P 处的辐射场强方向均沿 θ 方向, 那么, 由于空间波程差引起的相位差可表示为:

$$\Delta_n = n \frac{d}{\lambda} \cos \theta \quad (5)$$

假设该直线阵各阵元等间距分布, 间距为 d , 并且各阵元的辐射方向图相等, 均为 $\underline{C}_n(\phi, \theta)$, 那么, 该直线阵的远

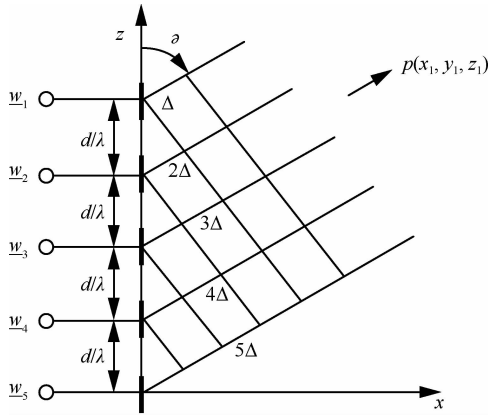


图3 远场条件下各阵元之间的相位差

场垂直面($\varphi = 0$)方向图可表示为:

$$C_{\text{ges}}(\vartheta) = \frac{1}{C_{\text{ges,max}}} C(\vartheta) \sum_{n=1}^N w_n [\exp(-j2\pi\Delta_n)] \quad (6)$$

$$C_{\text{ges}}(\vartheta) = \frac{1}{C_{\text{ges,max}}} C(\vartheta) \sum_{n=1}^N w_n a_n \quad (7)$$

$$C_{\text{gesdB}}(\vartheta) = 20 \lg \left[\frac{1}{C_{\text{ges,max}}} C(\vartheta) \sum_{n=1}^N w_n a_n \right] \quad (8)$$

$$a_n = \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} n d \cos \vartheta \right) \quad (9)$$

其中,复数值 w_n 为该天线系统的控制矢量,它由每一个阵元馈电的幅度和相位决定,这些权值决定了天线的方向图特性,比如副瓣、零陷等。

2.2 三维大规模天线阵列

在三维大规模天线阵列中,天线的方向图不仅由阵元的权值矢量决定,而且受到各个阵元上感应信号的影响,这与普通阵列天线有着极大的区别^[6]。

这种情况下,阵因子由式(10)给出:

$$E(\theta, \phi) = \sum_m \sum_n a_{mn} \exp \{ j [(md_x + \Delta_n) k(u - u_0) + nd_y k(v - v_0)] \} \quad (10)$$

对于5G大规模阵列天线,幅度分布 a_{mn} 为可分离的,则阵因子为:

$$E(\theta, \phi) = \{ \sum b_m \exp \{ jk [md_x(u - u_0)] \} \cdot \{ \sum c_n \exp \{ jk [(v - v_0) nd_y + \Delta_n(u - u_0)] \} \} \quad (11)$$

假设各阵元上的感应信号分量是平均值为0的平稳过程,对于给定的权值矢量 W ,阵列天线的辐射方向图即其平均输出功率,可以通过计算 $P(\theta, \phi, t)$ 的条件数学期望得到:

$$\begin{aligned} P(\theta, \phi) &= E[P(\theta, \phi, t)] \\ &= P_E^2(\theta, \phi) \tilde{W}^H E[S(t) S^H(t)] \tilde{W} \\ &= P_E^2(\theta, \phi) \tilde{W}^H R \tilde{W} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $E[\cdot]$ 表示数学期望运算, R 为有源阵列天线的相关系数矩阵,表示为:

$$R = E(S(t) S^H(t)) = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1N} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2N} \\ \cdots & \cdots & R_{jj} & \cdots \\ R_{N1} & R_{N2} & \cdots & R_{NN} \end{bmatrix} \quad (13)$$

相关系数矩阵中的元素表示阵元间的相关性,例如 R_{ij} 表示阵列中第 i 个阵元和第 j 个阵元间的相关性,即:

$$R_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^M s_{i,k} s_{j,k}^*}{\sqrt{\sum_{k=1}^M |s_{i,k}|^2} \sqrt{\sum_{k=1}^M |s_{j,k}|^2}} \quad (14)$$

这里假设 $s_i(t)$ 由 M 个元素组成: $s_{i,1}, s_{i,2}, \dots, s_{i,M}$,每个阵元的输入信号都为1。

因此,大规模阵列天线三维模型可表示为:

$$P(\theta, \phi) = P_E^2(\theta, \phi) \tilde{W}^H R \tilde{W} \quad (15)$$

很明显,有源阵列天线的辐射方向图不仅和各阵元的权值有关,而且由阵元间的相关程度决定。接下来对模型中的主要参数分别做讨论。

2.2.1 相关系数矩阵 R

为了简化模型并充分考虑到相关系数矩阵 R 的作用,假设阵元间的相关系数均为 ρ ,则相关系数矩阵 R 可表示为:

$$R = E(S(t) \cdot S^H(t)) = \begin{bmatrix} 1 & \rho & \cdots & \rho \\ \rho & 1 & \cdots & \rho \\ \cdots & \cdots & 1 & \cdots \\ \rho & \rho & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

众所周知, $R = \rho(U - I) + I = \rho U + (1 - \rho)I$,其中, U 为元素全为1的矩阵, I 为单位矩阵,则有源阵列天线的方向图模型可简化为:

$$\begin{aligned} P(\theta, \phi) &= \left(\frac{\rho}{N} \right) \cdot P_E^2(\theta, \phi) \cdot \left| \sum_{i=1}^N v_i \right|^2 + (1 - \rho) \cdot P_E^2(\theta, \phi) \\ &= P_E^2(\theta, \phi) \cdot \left[1 + \rho \cdot \left(\left| \sum_{i=1}^N v_i \right|^2 / (N - 1) \right) \right] \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)采用相对的权值矢量。

2.2.2 权值矢量 W

为了简化模型,令各阵元的权值均相等,即:

$$w_i = 1/\sqrt{N} \quad (18)$$

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T = (1/\sqrt{N})[1, 1, \dots, 1]^T \quad (19)$$

权值矢量 W 中没有考虑机械电倾角,因为机械电倾角是靠物理方式来控制的,它可以通过在优化中修正倾角值来实现。

2.2.3 单元天线的辐射方向图 $P_E(\theta, \phi)$

本节中 $P_E(\theta, \phi)$ 以 dB 的形式表示,则有如下变换:

$$20\lg(P_E(\theta, \phi)) = G_{E, \text{Max}} - \min\{-[A_{E,H}(\phi) + A_{E,V}(\theta)], A_m\} \quad (20)$$

其中, $G_{E, \text{Max}}$ 是辐射单元的最大增益,一般取 $G_{E, \text{Max}} = 8 \text{ dBi}$ 。
 $A_{E,H}(\phi)$ 是辐射单元的水平面方向图,可表示为:

$$A_{E,H}(\phi) = -\min\left[12\left(\frac{\phi}{\phi_{3\text{dB}}}\right)^2, A_m\right] \quad (21)$$

其中,水平半波功率宽度 $\phi_{3\text{dB}} = 65^\circ$,前后比 $A_m = 25 \text{ dB}$ 。

$A_{E,V}(\theta)$ 是阵元的垂直面方向图,可表示为:

$$A_{E,V}(\theta) = 20\lg \sin^3 \theta \quad (22)$$

3 5G 大规模天线的研究

在 5G 移动通信系统中,为了进一步提升功率效率、抑制无线通信系统中的干扰、提高无线通信系统的容量和覆盖范围、获得更精确的波束成形能力,大规模阵列天线成为实现这些需求的关键技术。随着天线阵列规模的扩大,考虑到阵列天线体积、带宽、增益、耦合等技术指标的限制,对 5G 大规模阵列天线的研究提出了更高的挑战。

强耦合效应的阵列天线是一种利用天线单元之间的电磁耦合来展宽天线工作带宽的天线阵列。紧耦合阵列天线(tightly coupled phased array, TCPA)具有超宽带的阻抗特性,往往能够达到超过 1:5 的频比,可以实现一定的波束扫描,是实现 5G 大规模阵列天线的良好方式。

3.1 紧耦合阵列天线的设计方法

紧耦合天线的辐射部分为具有互相强烈耦合的短偶极子,相邻振子通过电容进行耦合。单元之间的耦合,使得场可以在相邻单元之间传播从而增大工作带宽,同时减小单元的谐振频率。偶极子的长度通常为最大工作频率的半波长。

紧耦合天线放置在一块金属背板上方,剖面小于最高工作频率的半波长。金属反射板能够消除后瓣,使得紧耦合阵列天线单向辐射。

由于紧耦合天线的辐射单元为偶极子形式,因此,当采用微带线、同轴线等不平衡的馈线进行馈电时,需要通过具有宽频带、低损耗性能的巴伦进行平衡至不平衡的转换。

阵列进行波束扫描的时候,相邻单元之间存在馈电相差。这种相差会引起有源驻波的强烈变化,降低工作带宽。有学者提出,在阵列上方放置特定厚度的介质板可以抵消波束扫描时的阻抗变化,从而增大带宽。

综上所述,紧耦合天线由短偶极子、金属反射板、宽带巴伦、宽角匹配层等几个结构组成。

3.2 紧耦合阵列天线的仿真设计

3.2.1 子单元的设计

紧耦合阵列天线的子单元结构如图 4 所示。子单元中的偶极子两臂分别印制在介电常数为 2.2、厚度为 0.25 mm 的 Rogers 5880 介质板上。紧密排列的偶极子互相重叠。天线采用微带线形式的不平衡馈电结构。馈电端口特性阻抗为 150 Ω 。子单元的尺寸为:5.42 mm×8.13 mm×10.45 mm。

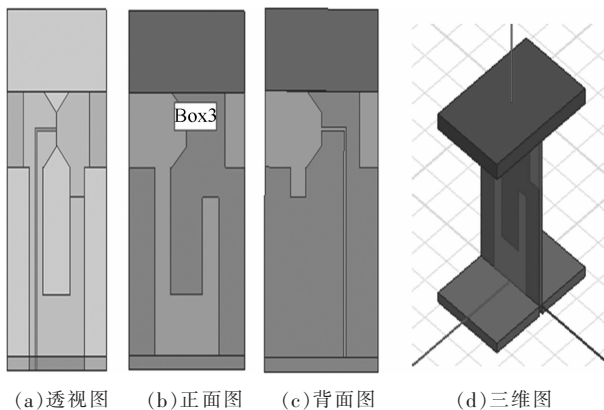


图 4 子单元示意

3.2.2 阵列天线布阵方式

设计的阵列天线为阵间距等于 11.5 mm 的矩形平面阵,极化方式为 45°。阵列形式如图 5(a)所示。通常基于紧耦合效应的偶极子单元尺寸小于阵列波长的 1/4,因此采用子阵列的设计方案,即将阵列分解为如图 5(b)所示的形式,其中每一个单元为一个子阵,该子阵可由 1~4 个子单元构成,如图 5(c)所示。

根据子单元的结构尺寸,图 4(b)中每个子阵列的大小为 8.13 mm×16.26 mm。本文中,一个子阵列由 3 个子单元构成,子单元的尺寸为 5.42 mm×8.13 mm。考虑到端口阻抗匹配,每个子单元的输入阻抗设计为 150 Ω ,通过将 3 个相邻子单元并联,实现 150 Ω 到 50 Ω 的阻抗变换,具体阵列结构如图 6 所示。

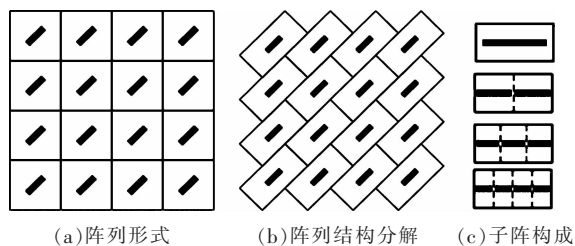


图5 阵列布阵结构

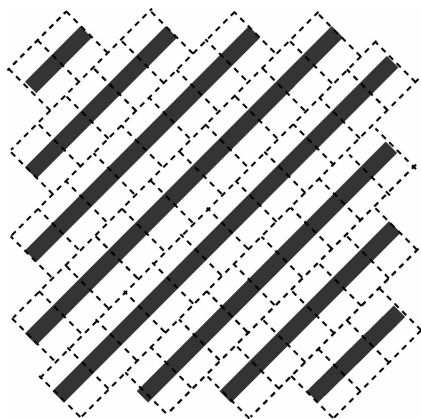


图6 子单元阵列组阵示意

3.2.3 子阵列结构分析与设计

本文设计的子阵列将3个首尾相互强耦合的短偶极子进行组阵,如图7所示。

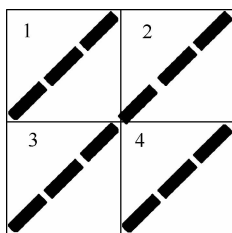
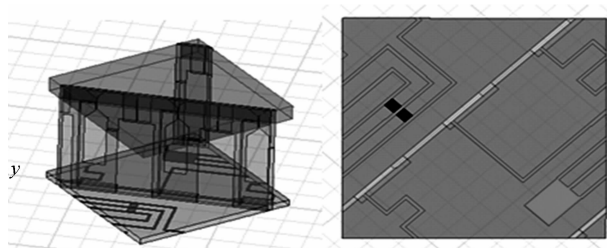


图7 子阵列的布阵方式

利用 HFSS (high frequency structure simulator, 高频电磁仿真软件)对子阵列进行了建模分析,子阵模型及馈电模型如图8所示。3个子单元的微带馈线穿过金属反射板,与金属反射板后方的微带功分器相连。为了使3个子单元馈电的相位一致,采用曲折线来补偿微带线长度的差距。金属反射板后方为 Rogers 5880 介质,厚度为 0.5 mm。由于子单元的输出阻抗为 $150\ \Omega$,这里的微带线宽度选择为 0.15 mm。将3根 0.15 mm 微带线并联到 1.5 mm 线宽的微带线上,实现 $150\ \Omega$ 到 $50\ \Omega$ 的阻抗转换。

3.2.4 5G 大规模阵列天线仿真

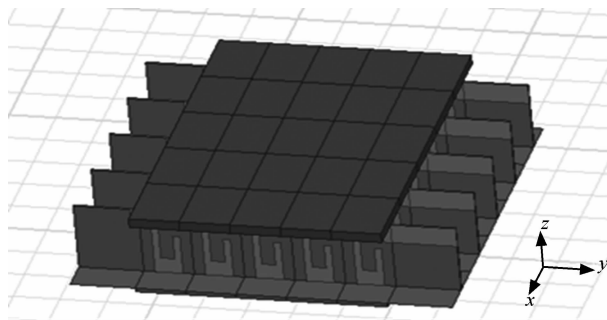
设计了一个 5×5 的 25 单元的阵列天线,仿真模型如图9所示。设 $N_x=n$ 代表沿 x 轴分布的第 n 个单元; $N_y=n$



(a)子阵模型

(b)馈电模型

图8 子阵模型及馈电模型

图9 5×5 阵列天线仿真模型

代表沿 y 轴分布的第 n 个单元。例如,第一排第3个单元表示为 $N_x=3, N_y=1$,其有源驻波表示为 $ActiveVSWR(31)$ 。

4 5G 大规模天线仿真结果

图10为本文设计的紧耦合子阵列及子单元的有源驻波比仿真结果。可以看出,子单元和子阵列在 2.58~17.1 GHz 频段满足 $ActiveVSWR < 3$,具有良好的匹配特性。

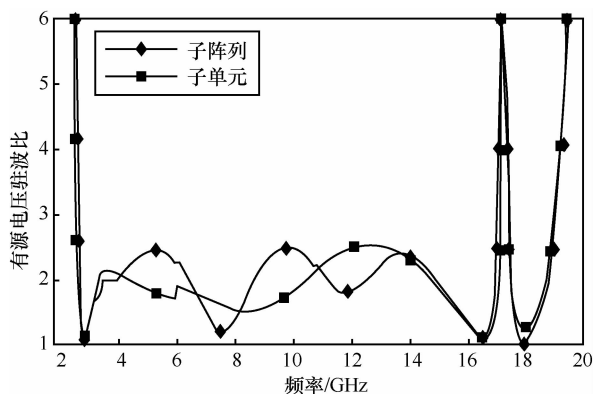
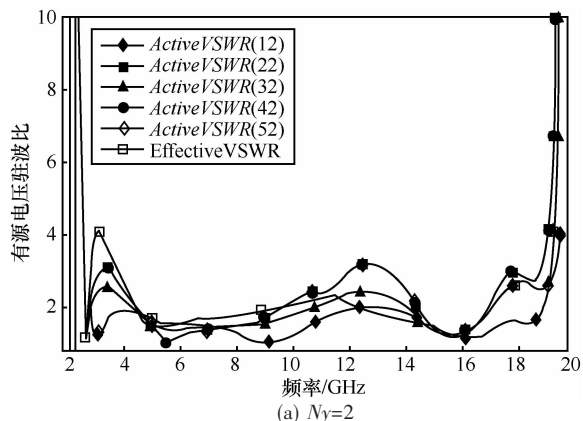
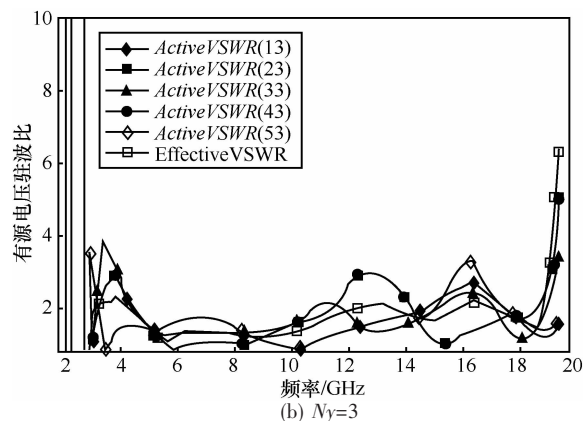
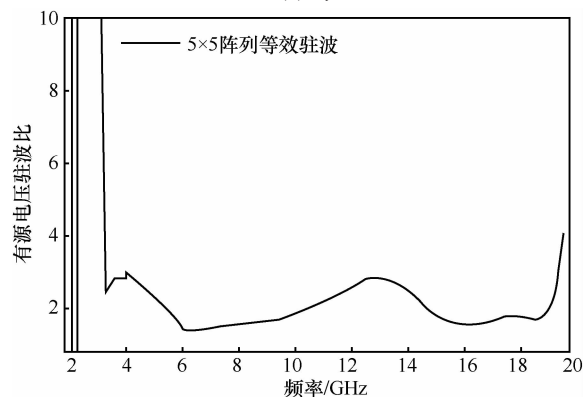


图10 子阵列及子单元的有源驻波比

图11给出了本文设计的 5×5 阵列天线的部分子单元的有源驻波比、有效驻波比(EffectiveVSWR)及整个阵列天线的等效有源驻波比。从图11中可以看出,该阵列天线在 2.8~19.2 GHz 频段满足 $ActiveVSWR < 3$,其相对带宽可达到 149.1%。

(a) $N_y=2$ (b) $N_y=3$ 

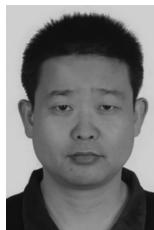
(c) 5x5 阵列天线等效有源驻波比

图 11 子单元及整体阵列有源驻波比

参考文献

- 1 Huawei. Presentation for MWC. Proceedings of Mobile World Congress, 2011
- 2 ITU Press Release. ITU World Radio Communication Seminar Highlights Future Communication Technologies, 2010
- 3 ITU M. Traffic Forecasts and Estimated Spectrum Requirements for Satellite Component of IMT 2000 and Systems Beyond IMT-2000 for the Period 2010 to 2020, 2006
- 4 Tzanidis I, Sertel K, Volakis J. Excitation and termination of finite tightly coupled antenna arrays based on structural characteristic modes. Proceedings of Antenna Applications Symp, Istanbul, Turkey, 2011
- 5 Jones M, Rawnick J. A new approach to broadband array design using tightly coupled elements. Proceedings of IEEE Military Communications Conference, Orlando, FL, USA, 2007
- 6 Tzanidis I, Sertel K, Volakis J. Characteristic excitation taper for ultra wideband tightly coupled antenna arrays. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2012, 60(4): 1777~1784
- 7 Tzanidis I, Sertel K, Volakis J. UWB low-profile tightly coupled dipole array with integrated balun and edge terminations. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61(6): 3017~3025

[作者简介]



高峰,男,中国移动通信集团设计院有限公司高级工程师,主要研究方向为无线通信与天线技术。

和凯,男,中国移动通信集团设计院有限公司工程师,主要研究方向为天线宽频带小型化技术、天线数值分析与优化、移动终端天线、智能天线等。

宋智源,男,中国移动通信集团设计院有限公司高级工程师,主要从事移动通信天线系统研究及优化分析、通信产品质量及性能的大数据分析等工作。

朱文涛,男,中国移动通信集团设计院有限公司工程师,主要研究方向为移动通信天线系统性能监测及优化、基于大数据的无线网络数据分析及质量控制。

王丽芳,女,中国移动通信集团设计院有限公司高级工程师,主要研究方向为移动通信网络。

高鹏,男,中国移动通信集团设计院有限公司教授级高级工程师,主要研究方向为无线通信。

5 结束语

本文介绍了 5G 移动通信技术的背景、发展历程以及大规模阵列天线对于 5G 移动通信系统的重要性;详细阐述了二维、三维阵列天线的基本原理和相关理论;在此基础上,重点介绍了紧耦合阵列天线,其具有体积小、带宽大等技术优势,是 5G 大规模阵列天线研究的重要方向;详细阐述了紧耦合阵列天线的构成、设计方法和设计步骤,设计出一种 5x5 的紧耦合阵列天线,该天线相对带宽可达到 149.1%,在 2.8~19.2 GHz 频段满足 $ActiveVSWR < 3$ 。