

引用格式:熊菊,苏泳涛,吉凯. 基于 OPNET 的卫星通信系统下行干扰建模与仿真研究[J]. 微电子学与计算机,2019,36(11): 49-54. [XIONG J, SU Y T, JI K. Research on modeling and simulation of downlink interference in satellite communication system based on OPNET [J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(11): 49-54]

基于 OPNET 的卫星通信系统下行干扰建模与仿真研究

熊 菊^{1,2,3}, 苏泳涛^{2,3}, 吉 凯^{1,2,3}

(1 重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065;

2 中国科学院 计算技术研究所无线通信技术研究中心, 北京 100190;

3 移动计算与新型终端北京市重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 卫星多波束天线旁瓣带来的小区间同频干扰是卫星通信系统网络规划与工程设计的重要依据. 针对多波束天线旁瓣带来的干扰问题, 首先, 在系统频率规划和下行同频干扰产生机理分析的基础上, 得到多波束卫星通信系统下行同频干扰模型; 其次, 根据 ITU-R S. 672-4 建议书给出的天线辐射特性设计卫星单波束天线模型; 然后, 根据单波束天线模型以及多波束天线覆盖地面的要求, 通过几何分析运算得到多波束天线的覆盖参数; 最后, 利用 OPNET 网络仿真软件, 利用 ema 编程机制对卫星单波束天线建模, 并通过位于同一经线上间隔 1.2° 的 109 个移动数据接收器的移动统计, 得到卫星多波束天线覆盖下, 东、西经 80° 且南、北纬 64.8° 的矩形区域内, 卫星多波束天线的辐射特性以及 7 小区同频和 3 色复用方式下的下行同频干扰特性. 仿真结果显示, 提出的建模方案能较为准确地计算出卫星多波束天线覆盖下任意经纬度的载干比和全网的载干比强度图.

关键词: 干扰; 多波束天线; 载干比; OPNET

中图分类号: TN927+.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2019)11-0049-06

Research on modeling and simulation of downlink interference in satellite communication system based on OPNET

XIONG Ju^{1,2,3}, SU Yong-tao^{2,3}, JI Kai^{1,2,3}

(1 School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2 Wireless Communication Technology Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3 Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Beijing 100190, China)

Abstract: Inter-cell co-interference caused by side lobes of satellite multi-beam antenna is an important basis for network planning and engineering design of satellite communication system. Aiming at the interference problem caused by the side lobes of multi-beam antennas, firstly, based on the analysis of system frequency planning and downlink co-channel interference generation mechanism, the downlink co-channel interference model of multi-beam satellite communication system is obtained. Secondly, the satellite single beam antenna model is designed according to the antenna radiation characteristics given in Recommendation ITU-R S. 672-4. Then, according to signal beam antenna model and the requirements of the multi-beam antenna covering the ground, the coverage parameters of multi-beam antenna are obtained through geometric analysis. Finally, using the OPNET network simulation software, the satellite single beam antenna is modeled by the ema programming mechanism, and in a rectangular area of 80° east

and west longitude and 64.8° north and south latitude, radiation characteristics of multi-beam antennas and downlink co-channel interference characteristics of 7-cell co-frequency and 3-color multiplexing are obtained through the mobile statistic of 109 mobile data receivers located at 1.2° apart on the same meridian. The simulation results show that the proposed model can accurately calculate the carrier interference ratio of any latitude and longitude under satellite multi-beam antenna coverage and carrier interference noise ratio intensity map of the whole network.

Key words: interference; multi-beam antenna; carrier interference ratio; OPNET

1 引言

卫星通信是地面通信系统的补充和延伸,是研究的热点之一. 由于可用的频率资源有限且不可再生,卫星通信系统中,通常采用多波束天线技术和频率复用技术来提高频谱利用率. 当频率复用因子较小时,频谱利用率较高,但同频波束相距较近,同频干扰较大;当频率复用因子较大时,频谱利用率较低,但同频干扰较小. 因此,对卫星通信系统中干扰的建模是进行系统频谱规划的重要依据,也是功率控制、干扰协调等技术的键. 国内外基于干扰相关技术的研究已有不少,文献[1-4]研究了不同网络场景中干扰相关的技术,文献[5]研究了卫星通信系统中 KU 和 KA 频段信道在雨衰影响下,时变载干比统计分布的预测方法,文献[6]研究了 2 色复用下,多波束卫星通信系统上行链路的干扰管理策略,文献[7]研究了地球静止轨道(Geosynchronous Earth Orbit, GEO)多波束卫星通信系统中,前向链路用户端的同频干扰消除技术. 由于文献[8]中所用的天线模型不含旁瓣,不能准确体现出卫星多波束的天线旁瓣带来的干扰,所仿真出的信噪比不符合实际卫星通信系统的情况.

OPNET 网络仿真软件可灵活部署不同的网络结构,根据需求对网络模块建模,设置网络节点的功能属性、运动属性,能够模拟较为准确得模拟地形参数、导入地形参数,是一个能够较好地模拟真实通信环境的仿真软件. 国内外广泛借助于 OPNET 对不同通信系统和信道进行仿真研究^[9-10]. 但目前基于 OPNET 对多波束卫星通信系统干扰的仿真,还没有较深入的研究. 本文旨在对多波束天线和下行同频干扰建模的基础上,基于 OPNET 对卫星多波束天线旁瓣引起的干扰进行仿真研究,得到多波束覆盖区域下,地面上任意位置的载干比的大小.

2 模型分析

2.1 卫星通信系统下行干扰模型

多波束卫星通信系统中,由于天线旁瓣泄漏到

其他波束的主瓣,当相同频段的多个小区中的用户同时通信时,会对其他小区产生干扰. 下行干扰的产生分以下 3 种情况:

- (1)干扰用户与期望用户在相同卫星下相同波束产生的干扰;
- (2)干扰用户与期望用户在相同卫星下相同频段的不同小区产生的干扰;
- (3)干扰用户与期望用户在不同卫星下的相同频率覆盖区产生的干扰.

本文采用多波束天线组成的蜂窝状小区,对相同卫星下的相同频率的不同小区产生的同频干扰进行建模分析.

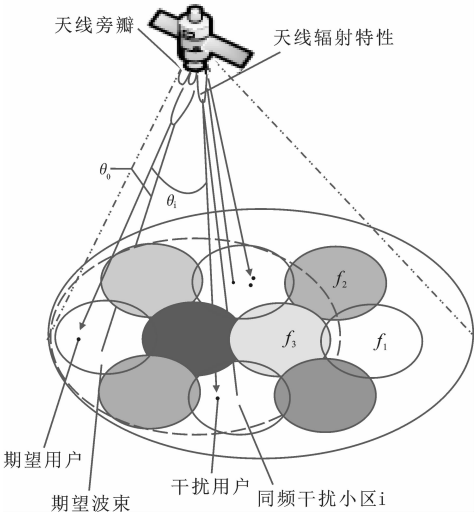


图 1 卫星通信系统下行干扰分析

图 1 所示为卫星通信系统下行链路同频干扰分析图,其中 θ_i 为期望用户偏离同频干扰小区 i 波束轴线的角度, θ_0 为期望用户偏离所在小区天线中心轴线的角度.

期望用户的接收信号功率:

$$p_r^{\text{down}} = p_t G_t(\theta_0) G_r(\varphi) \alpha \tag{1}$$

式中, p_t 为期望波束发送信号功率; $G_t(\theta_0)$ 为期望波束发送天线增益; θ_0 为期望用户偏离所在波束天线轴线的角度; $G_r(\varphi)$ 为期望信号接收天线增益; φ 为接收信号方向偏离接收天线轴线的角度; α 为路径损耗,包括自由空间损耗、阴影效应、多径衰落和大

气条件对信号的衰减. 其中,自由空间损耗 L_p 为:

$$L_p = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 = \left(\frac{c}{4\pi d f}\right)^2 \quad (2)$$

式中, λ 为波长; c 为光速; f 为信号频率; d 为传播距离,均为国际单位.

期望用户的接收干扰功率为:

$$p_I^{\text{down}} = \sum_{i=1}^N p_i^i G_i(\theta_i) G_r(\varphi) \alpha^i \quad (3)$$

式中, N 为同时通信的同频干扰小区的数量; p_i^i 为卫星波束小区 i 的发送功率; $G_i(\theta_i)$ 为期望用户偏离干扰波束 i 天线轴线的角度为 θ_i 的发送天线增益; $G_r(\varphi)$ 为接收信号偏离期望用户终端天线轴线的角度为 φ 的接收天线增益,由于终端通常采用全向天线,因此接收天线增益通常为常数,与夹角 φ 无关. α^i 卫星波束小区 i 发送的干扰信号的路径损耗. 由于干扰信号与期望信号频带相同,并且沿着期望信号的传播路径与期望信号同时到达接收端,因此,干扰信号和期望信号经过相同的信道条件,路径损耗大小相同. 因此,式(1)(3)中,有 $\alpha = \alpha^i$.

由式(1)和(3),则接收信号载干比为:

$$\frac{C}{I} = \frac{p_r^{\text{down}}}{p_I^{\text{down}}} \quad (4)$$

获得卫星天线增益的关键是计算用户位置偏离天线轴线的角度. 假设地面上一点的大地坐标为 (b, l, h) , b, l, h 分别为经度、纬度和离地面的高度,将大地坐标转换为地心直角坐标为 (x, y, z) ,假设地球为偏心率为0的正球形,则:

$$\begin{aligned} x &= (h + R) \cos(b) \cos(l) \\ y &= (h + R) \sin(b) \cos(l) \\ z &= (h + R) \sin(l) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, R 为地球半径,西经和南纬用负值表示,东经和北纬用正值表示,均为国际单位.

在地心直角坐标系中,假设卫星坐标为 $s(x_s, y_s, z_s)$,波束 i 中心点坐标为 $b_i(x_b^i, y_b^i, z_b^i)$,期望用户坐标为 $u(x_u, y_u, z_u)$,令:

$$\begin{aligned} \vec{su} &= (x_u - x_s, y_u - y_s, z_u - z_s) \\ \vec{sb}_i &= (x_b^i - x_s, y_b^i - y_s, z_b^i - z_s) \end{aligned} \quad (6)$$

则,期望用户偏离同频小区 i 天线轴线的角度为:

$$\theta_i = \arccos \frac{|\vec{su} \cdot \vec{sb}_i|}{|\vec{su}| |\vec{sb}_i|} \quad (7)$$

2.2 单波束天线模型

国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)的建议书 ITU-R S. 672-4 给出卫

星单波束天线旁瓣辐射方向图的包络函数,用于卫星通信相关参数的估算^[11],文献[12]给出仅含主瓣的卫星天线辐射特性. 则卫星单波束天线的辐射特性估算参考模型如下:

$$G(\theta) =$$

$$\begin{cases} G_m - 3(\theta/\theta_a)^2 & \text{dBi} & 0 \leq \theta \leq 2.58\theta_a \\ G_m - 20 & \text{dBi} & 2.58\theta_a < \theta \leq 6.32\theta_a \\ G_m - 25\log(\theta/\theta_a) & \text{dBi} & 6.32\theta_a < \theta \leq \theta_\beta \\ 0 & \text{dBi} & \theta_\beta < \theta \end{cases} \quad (8)$$

式中, $G(\theta)$ 为偏离轴线角度为 θ 的增益大小; G_m 为天线的最大增益,与天线口径大小、效率等因素有关; θ_a 为3dB波束宽度的一半; θ_β 为式中第三个等式等于0dBi时的 θ 值.

设天线最大增益为 $G_m = 30\text{dBi}$,3dB波束宽度为 4° ,则 $\theta_a = 2^\circ$,因此,该卫星天线的辐射特性如图2所示.

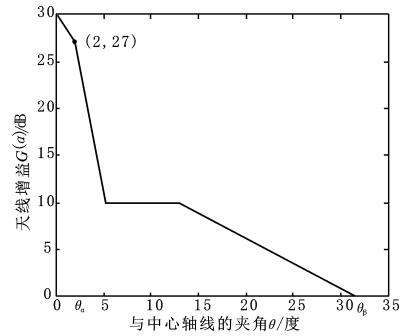


图2 卫星点波束辐射特性参考模型

2.3 多波束天线覆盖模型

在卫星节点中,通过设置多个单波束天线的不同指向即可实现卫星多波束天线的覆盖.

图3为7个波束的卫星天线覆盖图. 假设中心小区的波束中心点位于0经度和0纬度,即(0,0). 由几何关系可知,周围6个小区的中心 $o_1, o_2, o_3, o_4, o_5, o_6$ 分别位于与 x 轴夹角 ψ 为 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ, 300^\circ$ 的以 o 为原点 $\sqrt{3}r$ 为半径的圆周上,其中 r 为单波束天线的覆盖半径. 将6个圆心均分别沿着 x, y 轴做垂线,再将得到的 x, y 分量用于计算相应圆心的经纬度.

$$on_x = |oon| \times \cos\psi = \sqrt{3}r \times \cos\psi \quad (9)$$

$$on_y = |oon| \times \sin\psi = \sqrt{3}r \times \sin\psi$$

式中, $|oon|$ 为波束中心 o 与波束中心 on 之间的距离; on_x, on_y 分别为波束中心点 on 投影到 x 轴(纬线)和 y 轴(经线)方向的距离; ψ 为小区中心点 on 与 x

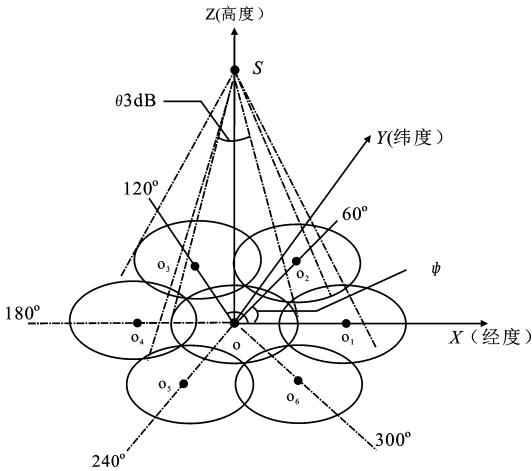


图3 卫星7波束覆盖图

轴的夹角. 赤道附近纬线上, 每一经度约相差 111.32 km, 因此, 各中心点经纬度分别表示为:

$$on_{long} = \frac{on_x}{111.32} \tag{10}$$

$$on_{lati} = \frac{on_y}{111.32}$$

GEO 卫星位于高 $H = 35\,786\text{ km}$ 的 S 点, 令 $\theta_{3dB} = 4^\circ$, 则

$$r = H \times \tan\left(\frac{\theta_{3dB}}{2}\right) = 35\,786 \times \tan 2^\circ \approx 1\,249.67\text{ km} \tag{11}$$

由公式(9)(10)和(11), 和各中心点与 x 轴的夹角 ψ , 可计算各小区中心的经纬度为:

$o(0,0)$ 、 $o1(19.444,0)$ 、 $o2(9.722,16.839)$ 、
 $o3(-9.722,16.839)$ 、 $o4(-19.444,0)$ 、 $o5(-9.722,$
 $-16.839)$ 、 $o6(9.722,-16.839)$

3 OPNET 天线建模与仿真

3.1 OPNET 单波束天线建模

天线的辐射特性在整个 3 维空间均存在, 天线的建模和仿真需要将连续的天线辐射特性离散化用于计算机处理. OPNET 仿真内核调用天线模型时, 根据收发机所在位置的坐标, 与天线轴线的指向, 查找存储的离散增益值, 得到相应的收、发信号的天线增益值.

如图 4 所示, 令天线的辐射特性增益值最大的方向为 z 轴, 垂直于 z 轴的平面为 xy 平面. 在空间中将天线模型划分为一系列与 z 轴夹角为 ϕ 的圆锥面, 将该圆锥面投影到 xy 平面形成圆, 圆上点的横坐标为 θ , 圆锥面的母线长度代表相应的增益值.

OPNET 中采用 ema 编程机制, 对天线进行建

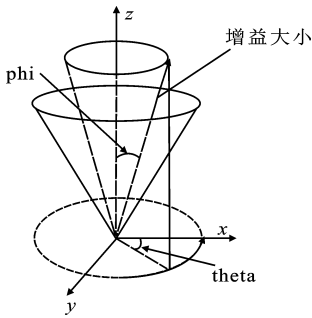


图4 天线模型坐标系

模. 设置相邻两个锥面角度之差 $\Delta\phi = 0.1$, 圆上两点坐标之差 $\Delta\theta = 0.1$ 时, 即将整个空间划分为 1 800 个圆锥面, 每个圆锥面的底面圆划分为 3 600 个点, 得到各点的增益值, 离散化整个 3 维空间的连续的增益值, 近似模拟天线的辐射特性. 得到 ITU 天线的辐射特性如图 5 所示.

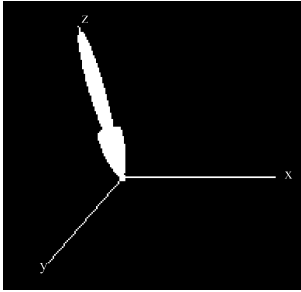


图5 卫星点波束天线模型

3.2 OPNET 多波束天线建模与仿真

通过设置多个单波束天线的不同指向即可形成卫星多波束天线, 设置包含 7 个波束的多波束卫星节点模型, 如图 6 所示. 单波束天线模型采用 1.2 节建立的式(8)的 ITU 天线模型, 设置各天线的中心指向采用 2.3 节所得的坐标. 卫星位于 $(0,0,35\,786\text{ km})$, 在 80°W 的经线上, 纬度从 64.8°S 到 64.8°N 范围内, 均匀放置 109 个移动数据接收器, 数据接收器之间的纬度间隔均为 1.2° . 这 109 个接收器从经度为 80°W 开始, 均沿着纬线向东运动, 直到 80°E 结束. 每向东移动 0.1° , 接收一次卫星发送给接收器的无线信号, 统计一次卫星的天线增益值和对应的经纬度数据, 得到卫星多波束天线的辐射特性如图 7 所示.

图 7 为卫星多波束天线增益分布图, 从图中可以看出个波束中心均为最大增益 30 dBi, 沿波束中心天线增益逐渐降低. 每个波束的旁瓣均与其他波束的主瓣在空间上相交叠.

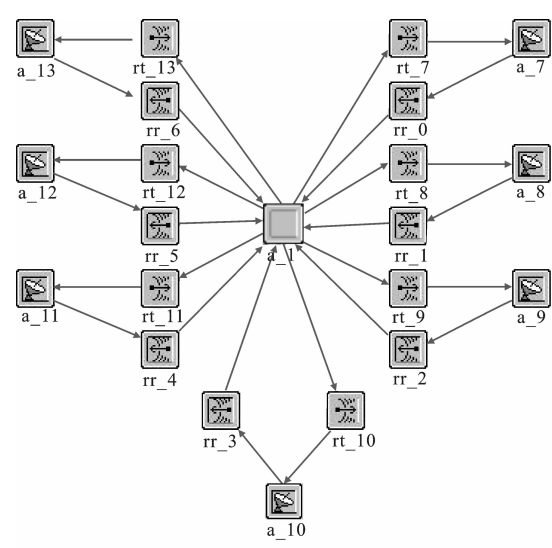
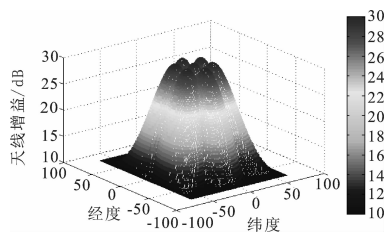
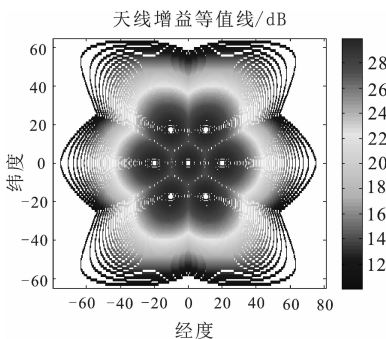


图6 卫星节点模型



(a)三维分布



(b)等值线分布

图7 卫星多波束天线增益分布

4 卫星通信系统下行干扰仿真

4.1 干扰计算

3色复用方式下,卫星的7个波束采用图1所示的频率设置,其中 $f_1=2\ 000\ \text{MHz}$, $f_2=2\ 002\ \text{MHz}$, $f_3=2\ 004\ \text{MHz}$,带宽均为 $B=1.5\ \text{MHz}$,发送功率均为 $p_t=100\ \text{w}$.7小区同频时,设置卫星7个波束的发送信号的频率均为 $f=2\ \text{GHz}$, $B=1.5\ \text{MHz}$,发送功率均为 $p_t=100\ \text{w}$.设置不包含自由空间损耗的卫星信道模型为典型的C. Loo信道模

型^[13],根据该信道模型的概率密度函数,通过抽样算法,产生服从该概率密度函数的随机数 k ,由于自由空间损耗为式(2)中的 L_p ,因此式(1)(3)中的路径损耗 $\alpha=\alpha^i=L_p\times k^2$.分别在7小区同频和3色复用的情况下,由公式(1)~(8)计算地面任意5个点的载干比如表1和表2所列.

表1 7小区同频载干比

坐标(b,l,h)	计算值/dB	仿真值/dB	均方误差/MSE
(0,0,0)	0.547 112 667	0.547 112 627 874	$1.530\ 8\times10^{-15}$
(-20,-30,0)	7.281 651 121	7.281 650 573 772	$2.994\ 6\times10^{-13}$
(15.4,18,0)	4.461 580 874	4.461 580 757 708	$1.352\ 4\times10^{-14}$
(23.7,0,0)	5.511 200 044	5.511 199 903 373	$1.977\ 6\times10^{-14}$
(28.6,-32.4,0)	4.538 487 496	4.538 486 846 959	$4.212\ 5\times10^{-13}$

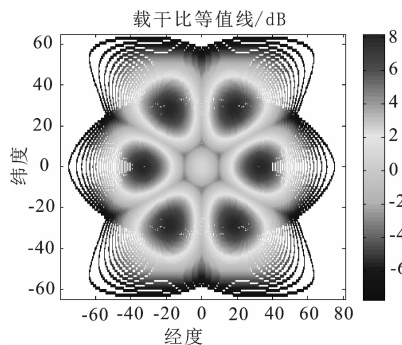
表2 3色复用载干比

坐标(b,l,h)	计算值/dB	仿真值/dB	均方误差/MSE
(-12.7,34.8,0)	11.522 200 04	11.522 198 139 835	$3.610\ 6\times10^{-12}$
(14.2,36,0)	10.682 200 04	10.682 198 127 468	$3.657\ 8\times10^{-12}$
(-30,0,0)	15.069 700 04	15.069 698 187 768	$3.430\ 8\times10^{-12}$
(47.8,-36,0)	6.1597 000 43	6.159 698 043 428	$3.998\ 3\times10^{-12}$
(-20,-40.8,0)	7.802 200 043	7.802 198 073 64	$3.878\ 4\times10^{-12}$

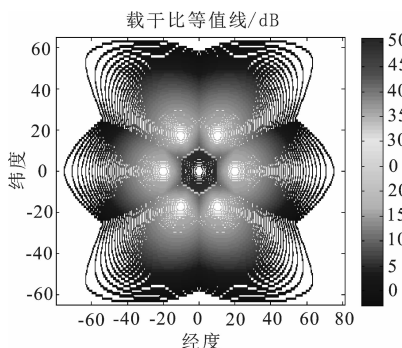
4.2 下行干扰仿真

由于本文是对卫星多波束天线旁瓣引入的干扰进行研究,同时为防止不存在干扰时,等式(4)出现分母为0的情况,因此,令分母加上一个常数 η ,并且 $0<\eta\ll0$,使仿真结果不受该常数的影响.3色复用方式下,卫星7个波束的频率 f_1 、 f_2 、 f_3 、带宽 B 和发送功率 p_t 以及7小区同频方式下,7个波束的频率 f 、带宽 B 和发送功率 p_t 均采用4.1节设置的参数,采用4.1节所述方法模拟典型的C. Loo卫星信道模型.采用3.2节的仿真场景和仿真方法,109个移动数据接收器统计载干比数据和对应的经纬度数据,分别得到7个小区同频和采用3色复用时载干比的强度图,如图8所示.

图8(a)为7小区同频时载干比强度图,由于中心小区与周围6小区均相邻,很大一部分区域均处在相邻6个波束的第一旁瓣区,受到的同频干扰功率很大,因此载干比较边缘波束很小.(b)为采用3色复用时载干比图谱,由于中心小区频率与其它小区频率均不同,因此不受周围6小区的干扰,载干比很大.周围6个小区受与本小区同频的另外2的小区干扰,因此,载干比比7小区同频的高.从上图可以看出,由于小区中心的天线增益大,因此,小区中心比小区边缘的载干比高.



(a) 7 小区同频时载干比强度



(b) 3 色复用载干比图谱

图 8 载干比强度图

7 小区同频和 3 色复用模式下,得到与 4.1 节对应点的仿真结果如表 1 和表 2 所列,同时分别计算两种模式下,载干比的计算值和仿真值之间的均方误差 (Mean Square Error, MSE). 对比可知,任取的地面一点的载干比理论计算值和仿真结果基本吻合, MSE 均在 10^{-12} 数量级及以下。

实际通信中,通常采用频率复用的方式降低同频干扰,但这在降低干扰、增加系统容量的同时会降低频谱效率。因此,基于干扰强度进行频谱划分、网络规划等是设计卫星通信系统的依据。

5 结束语

本文研究了卫星单波束天线的数学模型,卫星多波束天线的覆盖模型和卫星通信系统中由于旁瓣带来的同频干扰,并基于 OPNET 研究了单波束天线的建模方法和多波束天线覆盖特性的仿真,最后针对 7 个波束同频和 3 色复用方式下,通过移动数据接收器收集不同的经纬度和相应载干比数据,仿真得到多波束天线旁瓣对接收信号带来的干扰图谱。为未来卫星通信系统设计和上层的无线资源管理、干扰消除等技术设计提供依据。

参考文献:

- [1] AN KANG, LIN MIN, LIANG TAO, et al. Performance analysis of multi-antenna hybrid satellite-terrestrial relay networks in the presence of interference[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(11):4390-4404.
- [2] LIU LING, ZHOU YIQING, TIAN LIN, et al. Interference aware CoMP for macrocell-based heterogeneous ultra dense cellular networks[C]//2018 IEEE International Conference on Communications. Kansas City, MO: IEEE Press, 2018:1-6.
- [3] SUN BULE, ZHOU YIQING, TIAN LIN, et al. Successive interference cancellation based channel estimation for massive MIMO systems[C]//2017 IEEE Global Communications Conference. Singapore: IEEE Press, 2017:1-6.
- [4] AN KANG, LIN MIN, ZHUWEIPING, et al. Outage performance of cognitive hybrid satellite-terrestrial networks with interference constraint [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(11): 9397-9404.
- [5] PANAGOPOULOS A D. Time varying interference statistical distribution for direct-to-user satellite applications[J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(6):387-389.
- [6] COUBLE Y, ROSENBERG C, CHAPUT E, et al. Two-Color scheme for a multi-beam satellite return link impact of interference coordination [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(5):993-1003.
- [7] COCCO G, ANGELONE M, PÉREZ-NEIRA A I. Co-Channel interference cancellation at the user terminal in multi-beam satellite systems[C]//2014 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop. Italy: IEEE Press, 2014:43-50.
- [8] 张晓东. 基于 OPNET 的低轨星座卫星通信系统仿真建模研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [9] HASAN M S, YU H, CARRINGTON A, et al. Co-simulation of wireless networked control systems over mobile ad hoc network using simulink and OPNET[J]. IET Communications, 2009, 3(8):1297-1310.
- [10] ZHU CHENGYU, YANG O WW, AWEYA J, et al. A comparison of active queue management algorithms using the OPNET modeler[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(6):158-167.

位精度等性能,适用于 5G 低频段的通信系统中。目前该数字移相器未能表现出增益,后续可通过对巴伦电路和矢量合成电路的进一步优化,改善增益问题。

参考文献:

- [1] 孙朋朋,刘辉,耿苗,等. X 波段 4bit MMIC 数字移相器的设计与实现[J]. 半导体技术, 2017, 42(6): 431-435.
- [2] CHEN LIANG, CHEN XINYU, ZHANG YOUTAO. A high linearity X-band SOI CMOS digitally-controlled phase shifter[J]. Journal of Semiconductors, 2015, 36(6): 115-122.
- [3] LUO WEIJUN, LIU HUI, ZHANG ZONGJING, et al. High-Power X-Band 5-b GaN phase shifter with monolithic integrated E/D HEMTs control logic[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017(99): 1-7.
- [4] 段宗明,马强,王晓东,等. 200-800MHz 6-Bit CMOS 有源移相器设计[J]. 中国集成电路, 2015, 24(10): 37-42.
- [5] 陈阳. 硅基 CMOS 毫米波开关混频器的研究与设计[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
- [6] YAN T C, LIN W Z, KUO C N. A 3.5 GHz phase shifter of high input power range with digitally controlled VGA[C]// 2011 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology. Beijing, China, 2011:
- [7] BORIS M, NATHALIE D, ERIC K, et, al. A 60 GHz reconfigurable active phase shifter based on a vector-modulator in 65nm CMOS technology[J]. International Journal of Microwave & Wireless Technologies,

2016, 8(3): 399-404.

- [8] WOORIM S, REBEIZ G M. 60 GHz active phase shifter using an optimized quadrature all-pass network in 45nm CMOS[C] // IEEE MTT-S International Microwave Symposium digest, IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Montreal, Quebec, 2012.
- [9] DIPANKAR M, PALASH R, DEBASIS D. A variable high gain and high dynamic range CMOS phase shifter for phased array beamforming applications [C]// 2016 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT). Grand Forks, ND, USA, 2016:
- [10] CHEN YANG. A wideband photonic microwave phase shifter with 360-degree phase tunable range based on a DP-QPSK modulator [J]. Optics Communications, 2018(410): 787-792.

作者简介:

张 杰 男,(1993-),硕士研究生.研究方向为射频电路及集成电路技术.

吴 蓉 女,(1968-),硕士生导师,教授.研究方向为电路与系统和微电子技术.

徐 进 男,(1993-),硕士研究生.研究方向为微波集成电路的设计.

梁贤贤 男,(1994-),硕士研究生.研究方向为微波开关电路和器件.

来龙坤 男,(1995-),硕士研究生.研究方向微波集成电路和氮化镓电平控制电路.

罗卫军(通讯作者) 男(1981-),博士,副研究员.研究方向为 GaN 微波器件与集成电路.

E-mail:luoweijun@ime.ac.cn.

(上接第 54 页)

- [11] ITU-R S. 672-4. Satellite antenna radiation pattern for use as a design objective in the fixed-satellite service employing geostationary satellites[S]. Geneva: International Telecommunication Union, 1997.
- [12] 汪春霆,张俊祥,潘申富,等. 卫星通信系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2012.
- [13] LOO C, BUTTERWORTH J S. Land mobile satellite channel measurements and modeling[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(7):1442-1463.

作者简介:

熊 菊 女,(1991-),硕士研究生.研究方向为卫星干扰信道建模. E-mail:1179979329@qq.com

苏泳涛 男,(1976-),博士,副研究员.研究方向为通信信号处理、专用 DSP 架构和指令集设计、异构多核处理器实时任务调度.

吉 凯 男,(1994-),硕士研究生.研究方向为卫星系统建模与功控算法设计.