

基于 DBF 的星—地异构共存认知 MIMO 系统的干扰减缓

廖勇^{1,2}, 王韬¹, 陈欢¹, 周昕¹, 李瑜锋¹

(1. 重庆大学 飞行器测控与通信教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710000)

摘要: 针对星—地网络和地面无线网络共存现象逐渐增多和共存干扰日益严重的问题, 分析了一种地球同步轨道(GEO, geosynchronous earth orbit)星—地网络和地面 4G 移动通信网络异构共存的典型场景, 提出了一种地面次用户卫星地面站对地面主用户多入多出(MIMO, multiple input multiple output) 4G 基站干扰的异构多用户认知系统模型, 并推导了其通用信号处理过程。同时, 在 4G 基站系统内采用数字波束形成(DBF, digital beam forming)技术最小化多天线多用户的认知干扰, 设计了一种基于固定方位干扰的最优波束权重(OBW-FAI, optimal beam weight based on fixed azimuth interference)抗干扰算法, 权重向量只与干扰源方位有关, 不需要实时和重复计算, 计算量小。最后, 数值仿真结果验证了所提系统和算法可以一定程度地改善星—地网络和地面无线网络异构共存的干扰。

关键词: 星—地异构共存; 认知网络; 多用户多入多出; 数字波束形成; 干扰减缓

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)10-0042-08

Interference mitigation for satellite-terrestrial heterogeneous coexistence cognitive MIMO system based on DBF

LIAO Yong^{1,2}, WANG Tao¹, CHEN Huan¹, ZHOU Xin¹, LI Yu-feng¹

(1. Key Laboratory of Aircraft Tracking Telemetry & Command and Communication of Ministry of Education, Chongqing University, 2. Chongqing 400044, China; 2. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract: For the coexistence and increasing interference of satellite-terrestrial network and terrestrial wireless network, a typical scenario where the geostationary earth orbit (GEO) satellite-terrestrial network and the 4G mobile communication network coexist heterogeneously was analyzed. Besides, a multi-user cognitive system model that secondary satellite terminals interfere the primary multiple input multiple output (MIMO) 4G based stations was also proposed, with whose general signal processing was deduced. Meanwhile, digital beam forming (DBF) technology in 4G based station system was adopted to minimize the cognitive interference caused by multi-antennas and multi-users. And an optimal beam weight based on fixed azimuth interference (OBW-FAI) was proposed. Weight vector was only related to the azimuth of the interferences, thus the proposed algorithm does not need real-time and repeat calculations, and had small complexity. Finally, the numerical simulation results verify that the proposed system and algorithm can effectively reduce interference between satellite-terrestrial network and terrestrial wireless network to a certain extent.

Key words: satellite-terrestrial heterogeneous coexistence; cognitive network; multi-user multiple input multiple output; digital beam forming; interference mitigation

1 引言

认知无线电(CR, cognitive radio)是目前解决

无线通信中频谱资源稀缺和利用率严重不足的一种最有效的技术, 近年来得到了广泛的研究和应用^[1]。典型的认知无线电接入授权频谱的方式主

收稿日期: 2014-05-14; 修回日期: 2014-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41474023); 中国空间技术研究院西安分院基金资助项目(Y12-KJCX-04); 中央高校基本科研业务重点基金资助项目(CDJZR165505, CDJZR160015)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (41474023); The Fund of China Academy of Space Technology (Xi'an) (Y12-KJCX-04); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (CDJZR165505, CDJZR160015)

要有 2 种: 一种是次用户感知到主用户空闲频谱, 采用机会方式接入, 一旦主用户需要使用当前频谱, 次用户无条件让出; 另一种是次用户感知到主用户正在使用授权频谱, 在不干扰到主用户正常通信的前提下, 和主用户网络共享频谱。当前, 第 2 种接入方式研究较多, 如何保证主用户服务质量(QoS, quality of service), 且次用户干扰不影响主用户的最低信噪比(SINR, signal to interference plus noise ratio)门限是目前研究的热点和难点。

目前, 抗干扰技术主要有频域抗干扰技术、时域抗干扰技术、空域抗干扰技术以及集成频域、时域、空域的抗干扰技术, 其中空域抗干扰技术主要通过智能天线实现, 而智能天线的核心技术之一是数字波束形成(DBF, digital beam forming)技术。DBF 技术可以在数字域内动态地形成所需要的各种波束。当天线处于接收状态时, 能保证在期望信号方向上的增益不受影响, 同时将方向图零点自适应对准干扰信号, 起到抑制干扰的作用^[2]。由于它具备以上特质, 在无线通信中得到了非常广泛的应用。

在认知无线电领域, 已有学者将 DBF 技术用于各种用途, 例如干扰控制^[3]、最大化信道容量^[4]、SINR 均衡^[5]等。但是, 次用户和主用户在共享频谱下的 DBF 技术仍然是当前的一个挑战。除此之外, 认知多入多出(MIMO, multiple input multiple output)系统的信道容量域也有较多研究^[6,7], 但是基于 DBF-MIMO 的认知系统研究目前很少。

随着近年来人们对 5W (whoever, wherever, whenever, whomever, whatever)通信需求的增加, 特别是在防灾减灾领域, 卫星通信变得越来越重要, 其利用率也逐渐得到提高。卫星网络是一个典型的资源受限网络, 如何通过认知技术提高卫星网络的智能化程度和使用效率, 是目前研究的热点。欧盟的萨里大学(英国)、卢森堡大学(卢森堡)等 6 所大学联合开展了“COgnitive RAdio for SATellite communications (CoRaSat)”的项目^[8], 旨在通过认知无线电方式灵活、智能地使用卫星频谱, 且取得了一些研究成果^[9]。在国内, 中国航天集团^[10]、中国卫星海上测控部^[11]、上海微小卫星研究中心^[12]、中国空间技术研究院^[13]、中国空间技术研究院西安分院^[14]和中国电子科技集团^[15]等单位均在不同程度上开展了这方面的研究, 但是其工作主要集中在一

些系统框架和概念层面。整体来看, 认知技术在卫星通信中的应用非常少^[15], 还有很多技术挑战, 其中, 卫星网和地面网的异构认知融合将是一个发展趋势。

在异构网络共存领域的已有的研究中, 研究人员大部分考虑的是地面无线通信网络异构共存的场景, 例如无线个域网(WPAN, wireless personal area network)和无线局域网(WLAN, wireless local area network)共存^[16], WLAN 和 WiMAX 共存^[17]等。而对于卫星网络和地面网络的异构共存应用方面, 美国的 Tawil C 等在 2005 年提出一种星—地共存场景并给出了对应的共享 Ku 波段频谱的方法^[18]: 卫星直播信号和地面广播信号进行重用, 并且在地面用户位置建议采用不同的方向天线从而达到频谱重用。但是该场景只是研究了地球同步轨道(GEO, geosynchronous earth orbit)直播卫星下行链路和地面广播信号对同一个地面接收机的干扰, 采用的是独立的方向天线对准不同的无线信号从而避免同频干扰, 并没有研究卫星地面站上行链路对地面接收机的同频干扰减缓办法, 也没有采用认知无线电技术共享频谱。意大利的 Sithamparanathan K 等在 2010 年提出了一种认知卫星地面无线电(CSTR, cognitive satellite terrestrial radio)技术^[19], 并应用于混合星地系统(HSTS, hybrid satellite-terrestrial system), 研究并分析了 2 类特殊地采用 CSTR 的 HSTS 的应用: 混合卫星和地面超宽带(UWB, ultra wide band) WPAN 的通信系统; 混合卫星和地面无线区域网(WRAN, wireless regional area network)的通信系统。在这 2 种应用场景中, 地面卫星终端上行链路和地面无线通信系统均采用了 CR 功能, 研究结果表明, 未来的卫星地面终端需要和地面无线通信系统异构共存, 而采用 CR 技术是解决共享有限的无线频谱最有效可行的方法, 但是本文并没有针对卫星和主流地面运营商构建的移动通信系统展开研究, 缺乏对采用 CR 的异构网络通信系统进行信号处理分析, 也未提供同频干扰减缓方法。可见, 欧美一些国家已经陆续在星—地网络异构共存方面展开了研究和应用, 但是整体而言, 星—地网络异构共存应用研究还非常之少。对我国而言, 这方面的应用研究才刚刚起步, 尚有非常多的基础理论与关键技术需要攻克。

我国经过专家多年的需求论证^[20, 21], 即将建设基于 GEO 且工作在 S 频段的卫星移动通信系统^[22]。随着该系统的建设和运营, 将会极大地弥补地面蜂窝移动通信的不足, 同时, 也应注意, 由于频谱资源的稀缺, 随着未来卫星地面用户的增多和频繁的使用, 当 GEO 卫星移动通信系统采用认知方式和地面无线网络共享同一频段时, 不可避免地会干扰到地面无线通信系统, 典型的有 4G 移动通信系统。由于 4G 基站(BS, base station)一般建设在距离地面一定高度的位置, 且配备有 MIMO 功能的多天线, 当地面移动用户和 4G BS 上行通信时, 如果附近一定区域内的天链卫星地面用户此时也在和天链星进行上行通信, 那么就会对移动 BS 造成接收干扰。

针对以上共存干扰问题, 本文在已有类似星—地异构共存应用场景、欧美和我国认知卫星通信等前沿研究的基础上, 针对一种典型的 GEO 星—地网络和地面 4G 移动通信网络共存场景, 提出了一种地面次用户卫星地面站对地面主用户 MIMO 4G BS 干扰的异构多用户认知系统模型, 并推导了其通用信号处理过程。同时, 在 4G BS 系统内采用 DBF 技术最小化多天线多用户的认知干扰, 设计了一种对抗固定方位干扰源的基于固定方位干扰的最优波束权重算法(OBW-FAI, optimal beam weight based on fixed azimuth interference)。最后通过蒙特卡罗方法数值分析了该系统的信道容量和 SINR 性能指标。

2 系统与信号模型

2.1 系统模型

考虑卫星和地面网络共存场景, 2 个网络都工作在上行链路, 卫星链路作为次用户链路, 地面链路作为主用户链路。本文中, 考虑拥有便携式(车载、背负式等)甚小口径终端(VSAT, very small aperture terminal)的 GEO 卫星移动通信系统, 工作在 S 频段, 并且暂考虑 VSAT 工作位置可根据需要移动, 但在与 GEO 卫星通信时其位置相对固定的情况, 由于其天线口径小, 波束较宽, 因此, VSAT 容易干扰地面别的通信系统。同时, 地面的 4G 网络也在 S 频段提供给移动用户接入。4G 移动用户对 GEO 卫星的干扰可以忽略, 但是卫星地面站对 4G BS 的干扰将是本文考虑的重点。

以我国为例, 我国地处北半球, 在我国区域内安装的卫星地面站与 GEO 卫星通信时, 都是面向的南面, 图 1 为 GEO 星—地网络与 4G 网络异构共存拓扑。在该场景中, 部署在 4G 基站附近以北的 VSAT, 当采用认知方式和 4G 移动网络共享 S 频段, 上行链路过 4G 基站时, 会对 4G 基站接收移动用户上行链路信号产生同频干扰。

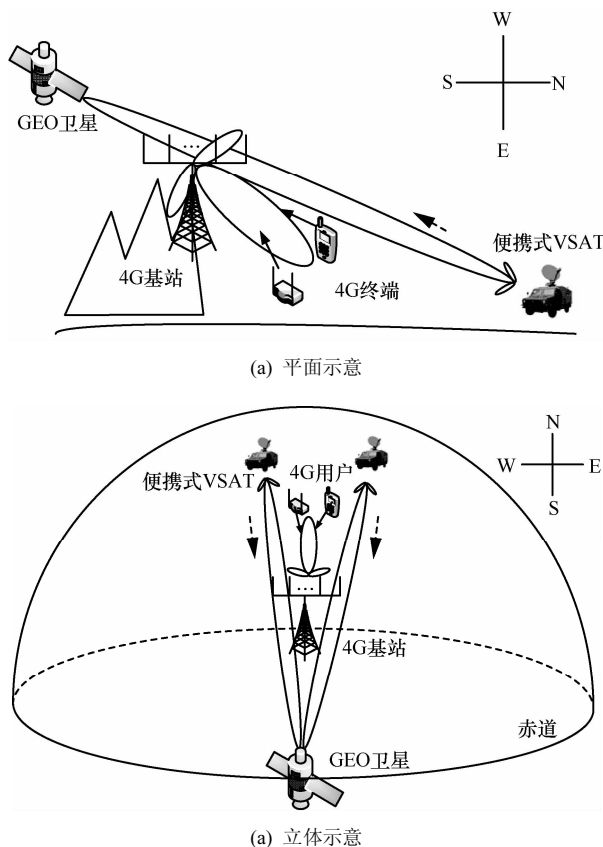


图 1 GEO 星—地网络与 4G 网络异构共存拓扑

采用基于 DBF-MIMO 的信号处理系统来减缓地面次用户 MIMO 卫星地面站对主用户 4G BS 的接收干扰。

2.2 信号模型

所提系统的信号处理模型如图 2 所示。为便于分析 MIMO 多用户, 考虑配备了多天线的 4G 固定接入用户(如 4G MIMO 无线路由器)作为主用户, 一般的 4G 手机用户为单天线系统, 可认为是特殊的 MIMO 主用户。

令 4G BS 有 M 个天线阵, 每个天线阵有 L 个阵元, 一共有 K 个主用户和次用户。

在上行链路, 每个用户有 N 个天线, 用户与 BS 的信道属于 MIMO, BS 采用 DBF 技术区分不

同用户数据。BS 接收到的信号矢量 \mathbf{y} 可以写为

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K \mathbf{h}^k \mathbf{a}(\theta^k) x^k + \mathbf{z} \quad (1)$$

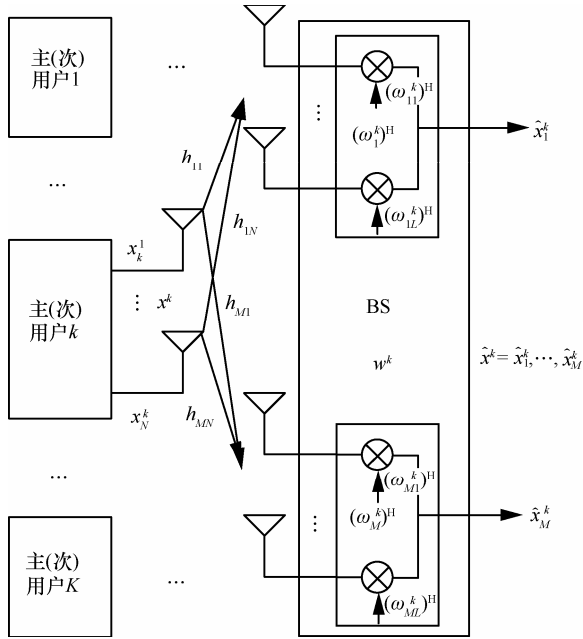


图 2 MIMO 多用户到 4G DBF-MIMO BS 上行链路模型

其中, $\mathbf{h}^k = [h_{mn}^k]$, $n \in N, m \in M$ 表示第 k 个用户到 BS 的 $M \times N$ 信道增益矩阵, h_{mn}^k 表示第 k 个用户的第 n 个发射天线和第 m 个接收天线阵之间的信道衰落系数, 并且假设用户天线和所有天线阵的天线之间是视距传输, 则 h_{mn}^k 都是常数; $x^k = [x_n^k]$, $n \in N$ 是第 k 个用户到 BS 的传输信号矢量, 代表第 k 个用户第 n 个天线的传输信号; $\mathbf{a}(\theta^k) = [\mathbf{a}(\theta_{mn}^k)]$ 表示第 k 个用户 $M \times N$ 的阵元响应矩阵, θ_{mn}^k 表示第 k 个用户的第 n 个天线到达第 m 个天线阵的方向角; \mathbf{z} 是 $M \times N$ 独立同分布的高斯噪声矩阵。第 k 个用户的阵元响应矩阵中的元素 $\mathbf{a}(\theta_{mn}^k)$ [23] 可以表示为

$$\mathbf{a}(\theta_{mn}^k) = \left[1, e^{\frac{-j2\pi d \sin(\theta_{mn}^k)}{\lambda}}, \dots, e^{\frac{-j2\pi(M-1)d \sin(\theta_{mn}^k)}{\lambda}} \right]^T \quad (2)$$

其中, d 是 BS 天线阵元之间的间隔, λ 表示发射天线的载波波长。

为便于分析, 考虑一个主用户(编号 d)和 $K-1$ 个干扰次用户的情况

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}^d \mathbf{a}(\theta^d) x^d + \mathbf{q} \quad (3)$$

其中, \mathbf{h}^d 是目标用户 d 到 BS 天线阵的信道增益矩

阵, $\mathbf{a}(\theta^d)$ 表示目标用户 d 的阵元响应矩阵, $x^d = \{x_1^d, \dots, x_N^d\}$ 表示主用户传输的信号, 且 $\mathbf{q} = \sum_{k=2}^K \mathbf{h}^k \mathbf{a}(\theta^k) x^k + \mathbf{z}$ 。为了从接收信号中获得目标

用户 d 的信号, 接收信号矩阵 \mathbf{y} 通过 BS 的权重矩阵 \mathbf{W} 产生阵元输出 \hat{x}^d

$$\hat{x}^d = \mathbf{W}^H \mathbf{y} \quad (4)$$

其中, 权重矩阵 $\mathbf{W} = \{\mathbf{w}^k\}$, $k \in K$, $\mathbf{w}^k = [\omega_{ml}^k]$, $l \in L$, $m \in M$; \mathbf{H} 表示汉密尔顿共轭转置。 \mathbf{W} 的选取原则是尽可能使式(3)的有用信号部分最大且干扰最小。

3 基于固定方位干扰的最优波束权设计

由于在设计场景中, 对 4G BS 主要的干扰来源于在其附近具有固定位置的卫星地面终端。为此, 设计了一种基于固定方位干扰的最优波束权重 OBW-FAI [24] 算法, 用于对抗固定方位干扰。

理想的波束权系数应该满足这样的条件: 1) 能够使目标方位上波束输出功率最大; 2) 使干扰方位波束输出为 0; 3) 不影响输出 SINR。设 4G 用户的目标方位为 θ , 其他固定的卫星地面站的方位为 θ_i ($i=1, 2, \dots, N$), 波束权重系数矢量为 \mathbf{W} , 这一波束形成器最优化求解问题可以描述为

$$\begin{aligned} \max(P_\theta) &= \max(\mathbb{E}[\hat{x}^d(t)^2]) \\ &= \max(\mathbf{W}^H [\mathbf{y}(t) \mathbf{y}^H(t)] \mathbf{W}) \\ &= \max(\mathbb{E}[x(t)^2] [\mathbf{W} \mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{W}] + \sigma^2 \|\mathbf{W}\|) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, P_θ 代表接收到方位角 θ 的阵列天线的功率, $\mathbb{E}[x(t)^2]$ 表示信号能量, σ^2 为白噪声方差。显然, 式(5)的最大值与下式等同

$$\max(\mathbb{E}[x(t)^2] [\mathbf{W} \mathbf{a}(\theta) \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{W}]) \quad (6)$$

约束条件为

$$\begin{cases} \mathbf{W}^H \mathbf{a}(\theta_1) = 0, \\ \mathbf{W}^H \mathbf{a}(\theta_2) = 0, \\ \dots \\ \mathbf{W}^H \mathbf{a}(\theta_{N-1}) = 0, \\ \mathbf{W}^H \mathbf{a}(\theta_N) = 0, \\ \|\mathbf{W}\| = \mathbf{W}^H \mathbf{W} = 1 \end{cases} \quad (7)$$

式(6)和式(7)的求解可以用拉格朗日乘子法

进行求解。最终，得到的最优权矢量为

$$W_{opt} = \frac{Ca(\theta)}{\sqrt{a^H(\theta)Ca(\theta)}} \quad (8)$$

其中， $C = I - a(\theta)[(a(\theta))^H a(\theta)]^{-1} (a(\theta))^H$ ， I 为单位矢量矩阵， $a(\theta) = [a(\theta_{mn}^k)]$ 表示第 k 个用户 $M \times N$ 的阵元响应矩阵， θ_{mn}^k 表示第 k 个用户的第 n 个天线到达第 m 个天线阵的方向角。

4 数值分析

为验证本文所提波束形成算法的性能，将 OBW-FAI 算法和经典波束形成算法直接矩阵求逆(DMI, direct matrix inversion)算法^[25]进行对比仿真分析。

4.1 性能指标

主要从以下 3 个指标衡量 DBF 算法的性能。

1) 吞吐量

由文献[26]可得，基于 DBF-MIMO 系统的信道容量的表达式为

$$C = \sum_{i=1}^M \text{lb}(1 + \text{SINR}_{opt}) \quad (9)$$

$$\text{SINR}_{opt} = f(W) = \frac{\gamma |W^H a(\theta^d)|^2}{W^H R_{i+n} W} \propto \frac{L}{N} \gamma \quad (10)$$

其中， M 是 BS 天线阵的数目； SINR_{opt} 是当权重 W 取到最优值时对应的最优 SINR ，它与阵元数 L 、 SNR γ 成正比，与目标用户的天线数 N 成反比； R_{i+n} 是干扰加噪声的协方差矩阵。

2) SINR

基于 BS 接收到的信号，可以通过式(8)计算 OBW-FAI 波束权重，通过式(10)计算出此 DBF 算法对应的 SINR 。如果 BS 接收到目标用户的 SINR 大于预期 SINR ，则目标用户的通信服务可以得到保证，如式(11)所示。

$$\text{SINR}_d \geq \text{SINR}_{th} \quad (11)$$

其中， SINR_{th} 表示目标用户的 SINR 门限。但是，如果该 $\text{SINR}_d < \text{SINR}_{th}$ ，那么目标用户的通信服务失败。

3) 波束形成的方向图

波束形成的方向图定义表达式为

$$G = 20 \lg(|W^H a(\theta^d)|) \quad (12)$$

为确保数据的可信度，采用蒙特卡罗方法进行数据的数值分析。

4.2 参数设置

考虑目标用户在 4G BS 的水平角-30°方向，干扰卫星地面站位于重庆(107° E, 30° N)范围内，方位角分布在 BS 水平方向角 5°~80°之间，随机均匀分布在距离 BS 半径为 85 m 的圆弧上，干扰卫星地面站的方向角已知，但是具体位置和干扰数目未知。BS 位于市郊，为满足郊区更大范围覆盖，站址建在小山丘之上，离地面高度为 100 m，天线阵列为理想的线性阵列，阵元间距为 $\lambda/2$ ，天线阵之间的间隔为 10λ 。其他仿真参数如表 1~表 3 所示。

表 1 GEO 卫星参数

参数	数值
卫星经度	115.5°E
覆盖的纬度范围	3°N~53°N
覆盖的经度范围	73°E~135°E
载波频率	2.3 GHz

表 2 VSAT 到 4G BS 参数

参数	数值
VSAT 发射功率	30 dBm
VSAT 天线增益	42.7 dB
VSAT EIRP	72.7 dBm
VSAT 天线口径	1.2 m
VSAT 和 BS 之间的距离	130 m
路径损耗	36.42 dB
BS 天线增益	10 dB
噪声功率(8 MHz)	-104.956 dBm

表 3 目标用户到 4G BS 参数

参数	数值
目标用户发射功率	20 dBm
目标用户天线增益	10 dB
目标用户和 BS 之间的距离	0.05~5 km
路径损耗范围	48.08~68.08 dB
BS 天线增益	10 dB
噪声功率(8 MHz)	-104.956 dBm

4.3 数值结果

1) 信道容量

由前面定义可知， N 表示用户的天线数目， M 表示 BS 天线阵数目， L 表示 BS 天线阵中阵元的数目，这样的系统用 $N \times (M, L)$ 表示。

由图 3 可见，当 BS 没有天线阵时，此时不存在任何数字波束形成算法，信道容量只受 MIMO 天线数目的影响，2×2 MIMO 系统的信道容量比 1×1 MIMO(即 SISO)系统的吞吐量明显提高接近 1 倍。当 BS 配置天线阵时，具备了数字波束形成能力，但是由于 OBW-FAI 和 DMI 生成最优波束权重的性能能力有所差异，故导致在相同的 SNR 情况下，对其他次用户的干扰减缓能力不一样，SINR 有所区别，从而体现在信道容量方面，采用 2×(2, 4) OBW-FAI-MIMO 比 2×(2, 4) DMI-MIMO 具有更好的信道容量。

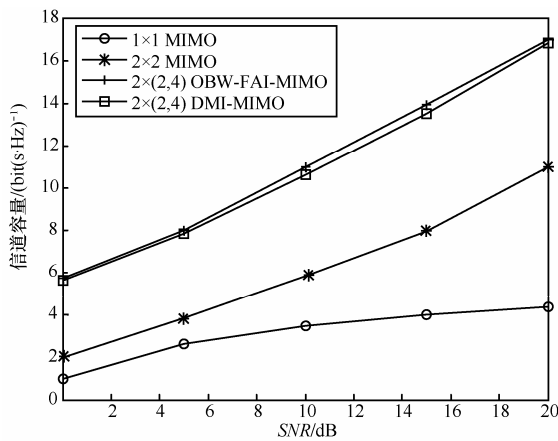


图 3 不同天线和数字波束算法下 SNR 和信道容量之间的关系

2) 波束方向

当所有用户数 $K=10$ 时，即干扰次用户数有 9 个，每个干扰用户的发射功率有 30 dBm，且其与 BS 的距离和达到 BS 的方向角是不同的。从干扰水平方向角分析，如图 4 所示，在 $5^\circ\sim 80^\circ$ 范围之内，DMI 算法对应的波束方向图由 -60 dB 变化到 -180 dB，OBW-FAI 算法对应的波束方向图由 -50 dB 变化到 -80 dB，显然，OBW-FAI 的天线波束增益要好于 DMI。

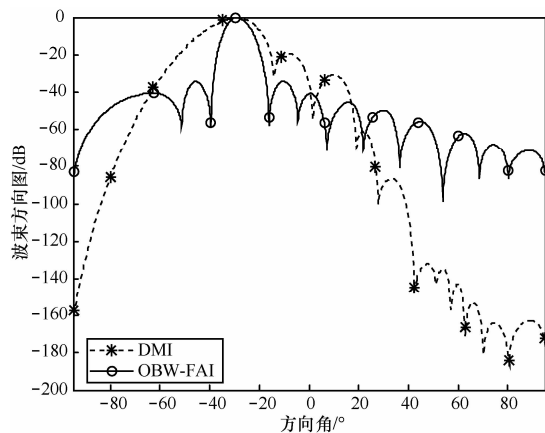


图 4 当 $K=10$ 时，2×(2, 4) 系统中不同波束算法对应的波束方向

3) SINR

图 5 可见，当天线水平方向角在 $5^\circ\sim 80^\circ$ 之间时，干扰用户对 BS 接收到的目标用户的 SINR 均有不同程度的影响，由于 OBW-FAI 算法可以尽可能地保证主瓣波束不受影响，同时，在给定的干扰方向形成波束指向性零点，对波束旁瓣具有一定的降低作用，故相比没有干扰抑制的 DMI 算法，对应的 SINR 更好。

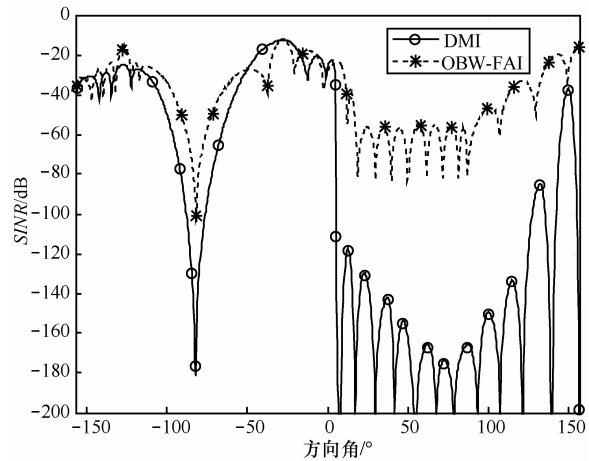


图 5 当 $K=10$ 时，2×(2, 4) 系统不同波束形成算法对应的 SINR

4) 干扰次用户数

从图 6 中可以得出，随着干扰次用户数的增多，OBW-FAI 和 DMI 算法的 SINR 性能都是逐渐下降的。但是由于 OBW-FAI 具有对抗固定用户方位干扰的能力，SINR 下降的趋势较为缓慢，而 DMI 算法没有对抗固定方位干扰的能力，SINR 下降趋势非常明显。当干扰卫星地面站用户数目超过 7 个时，OBW-FAI 的性能较干扰数小于 7 时，SINR 下降更快一些。这是由于 OBW-FAI 对抗固定用户方位干扰的能力是有限的。

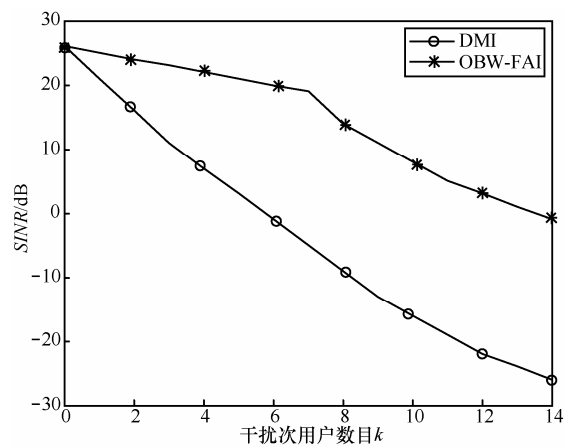


图 6 2×(2, 4) 系统不同波束形成算法下 SINR 和干扰用户数目的关系

以上数值分析结果表明, 实际 DBF-MIMO BS 的设计要充分考虑吞吐量、SINR 以及可能的干扰用户数目等因素, 综合选取用户发射天线数目、BS 天线阵数目、阵元数目以及合适的数字波束形成算法。

5 结束语

本文针对 GEO 星—地网络和地面 4G 移动通信网络异构共存干扰问题, 以一种典型的异构共存网络场景作为切入点, 提出了一种地面次用户卫星地面站对地面主用户 MIMO 4G BS 干扰的通用异构多用户认知系统模型, 并进行了较为完整的信号处理分析。同时, 为有效解决上行异构多用户干扰问题, 设计了一种基于固定方位干扰的最优波束权重算法 OBW-FAI, 在 4G BS 内使用 DBF 技术减缓干扰。最后数值仿真验证了所提系统和算法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2):201-220.
- [2] 王红霞, 潘成胜, 宋建辉. 星载智能天线波束形成技术[M].北京:国防工业出版社,2013.
WANG H X, PAN C S, SONG J H. Spaceborne Smart Antenna Beam-Forming Technology[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2013.
- [3] YIU S, VU M, TAROKH V. Interference and noise reduction by beamforming cognitive networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(10):3144-3153.
- [4] LUAN T, GAO F, ZHANG X D, *et al.* Rate maximization and beamforming design for relay-aided multiuser cognitive networks[J]. IEEE Transactions on Vehicle Technology, 2012,61(4):1940-1945.
- [5] CUMANAN K, MUSAVIAN L, LAMBOTHARAB S, *et al.* SINR balancing technique for downlink beamforming cognitive radio networks[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010,17(2):133-136.
- [6] AKIN S, GURSOY M C. On the throughput and energy efficiency of cognitive MIMO transmissions[J]. IEEE Transactions on Vehicle Technology, 2013, 62(7):3245-3260.
- [7] 李钊, 李建东, 刘勤等. 基于干扰对齐的认知 MIMO 系统频谱共享与用户调度[J]. 通信学报, 2014, 35(1):167-172.
LI Z, LI J D, LIU Q, *et al.* Interference alignment based spectrum sharing and user scheduling for cognitive radio MIMO system[J]. Journal on Communications, 2014, 35(1):167-172.
- [8] CoRASAT[EB/OL]. <http://www.ict-corasat.eu>. 2012-10-01/ 2014-03-26.
- [9] LIOLOS K, SCHLUETER G, KRAUSE J, *et al.* Cognitive radio scenarios for satellite communications: the CoRaSat approach[A]. Proceedings of Future Network and Mobile Summit[C]. Lisbon, Portugal: IEEE, 2013.1-10.
- [10] 李兴华. 基于软件无线电与认知无线电的空间信息获取[J]. 航天电子对抗, 2007, 23(6):33-35.
LI X H. Space information acquisition based on software-defined radio and cognitive radio[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2007, 23(6):33-35.
- [11] 刘辉峰, 朱近康. 基于认知无线电的小卫星群通信动态频谱分配[J]. 通信技术, 2008, 41(7):1-3.
LIU H X, ZHU J K. Dynamic spectrum allocation of little satellite group communication based on cognitive radio[J]. Communications Technology, 2008,41(7):1-3.
- [12] 马陆, 陈晓挺, 刘会杰等. 认知无线电技术在低轨通信卫星系统中的应用研究[A]. 第六届卫星通信新业务新技术学术年会[C]. 北京, 中国, 2010.270-277.
MA L, CHEN X T, LIU H J, *et al.* The application of cognitive radio technology in LEO satellite system[A]. Proceedings of 6th Annual Conference of Satellite Communications New Business New Technology[C]. Beijing, China, 2010. 270- 277.
- [13] 刘庆军, 毕少筠, 孙进等. 认知无线电技术在卫星导航系统中的应用前景[A]. 第三届中国卫星导航学术年会电子文集[C].广州, 中国, 2012.
LIU Q J, BI S J, SUN J, *et al.* Potential applications of cognitive radio technology in satellite navigation system[A]. Proceedings of 3rd Annual Conference of China's Satellite Navigation[C]. Guangzhou, China, 2012.
- [14] 陈鹏, 邱乐德, 王宇. 卫星认知无线电 CDMA 上行链路功率控制[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(11):2354-2360.
CHEN P, QIU L D, WANG Y. Uplink power control for CDMA satellite cognitive radio[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(11):2354-2360.
- [15] 张静, 蒋宝强, 郑霖. 认知无线网络技术在卫星通信中的应用[J]. 桂林电子科技大学学报, 2013, 33(4):284-287.
ZHANG J, JIANG B Q, ZHENG L. The application of cognitive radio network in the satellite communication[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2013,33(4):284-287.
- [16] ZHANG X, SHIN K G. Cooperative carrier signaling: harmonizing coexisting WPAN and WLAN devices[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2013,21(2):426-439.
- [17] SUN W, ZHANG P, CHEN Y, *et al.* A tight coupling cooperation scheme in WiFi/WiMAX heterogeneous mesh networks[J]. Interna-

- tional Journal of Computers Communications & Control, 2013, 8(3): 460-468.
- [18] TAWIL C, TAWIL S. Apparatus and Method for Transmitting Terrestrial Signals on a Common Frequency with Satellite Transmissions[P]. U S: US 6892050 B1, 2005.
- [19] SITHAMPARANATHAN K, NARDIS L D, BENEDETTO M G D, *et al.* Cognitive satellite terrestrial radio[A]. IEEE Global Telecommunications Conference[C]. Miami, FL: IEEE, 2010:1-6.
- [20] 张更新, 甘仲民, 李广侠. 对发展我国卫星移动通信的有关思考[J]. 卫星与网络, 2010,(5):32-34.
ZHANG G X, GAN Z M, LI G X. Study on the development of China satellite mobile communication[J]. Satellite & Networks, 2010, (5): 32-43.
- [21] 张更新, 甘仲民. 浅论我国卫星移动通信系统的发展思路和策略[J]. 数字通信世界, 2005,(7):24-27.
ZHANG G X, GAN Z M. Study on the development ideas and strategies of China satellite mobile communication system[J]. Digital Communication World, 2005,(7):24-27.
- [22] 闵长宁. 我国卫星移动通信系统需求调研和建设的若干建议[J]. 国际太空, 2012,(5):1-9.
MING C N. Some suggestions on demand for research and construction of China satellite mobile communication system[J]. Space International, 2012,(5):1-9.
- [23] KATKOVNIK V, LEE M, KIM Y. Performance study of the minimax robust phased array for wireless communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(4):608-613.
- [24] 王韬, 郑海升, 王坤等. 基于天线阵的多目标微位移测量方法[P]. 中国: ZL201410060204.4, 2014-02-21.
WANG T, ZHENG H S, WANG K, *et al.* Multi-objective Micro-displacement Measurement Method Based on Antenna Array[P]. China: ZL 201410060204.4, 2014-02-21.
- [25] LORENZ R G, BOYD S P. Robust minimum variance beamforming[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(5):1684- 1696.
- [26] DAI J, CHEN M, CHUNG P. Uplink capacity analysis of single-user SA-MIMO system[J]. Journal of Southeast University, 2013,29(1):1-6.

作者简介:



廖勇(1982-), 男, 四川自贡人, 博士, 重庆大学讲师, 主要研究方向为宽带无线网络通信、飞行器测控与通信等。

王韬(1977-), 男, 河南淮阳人, 博士, 重庆大学副教授, 主要研究方向为雷达信号处理。

陈欢(1989-), 女, 重庆人, 重庆大学硕士生, 主要研究方向为宽带无线网络通信。

周昕(1993-), 女, 重庆人, 重庆大学硕士生, 主要研究方向为宽带无线网络通信。

李瑜锋(1992-), 男, 湖北荆州人, 重庆大学硕士生, 主要研究方向为宽带无线网络通信。