



基于大阵列天线的 IMT-2020 基站与 DAB 地球站的共存仿真方法

何天琦¹, 王坦², 钱肇钧², 刘鹏¹

(1. 华北电力大学, 北京 102206;

2. 国家无线电监测中心/国家无线电频谱管理中心, 北京 100037)

摘要: 重点介绍了国际电信联盟最新发布的 IMT 模型建议书 ITU-R M.2101 中的阵列天线模型及相关参数, 并基于该模型对 1.4 GHz 的 IMT 系统下行干扰数字音频广播地球站的场景进行系统级仿真。采用集总干扰评估方法, 仿真了不同距离下大规模基站部署对中心地球站的干扰, 并通过比较干扰门限得到保护距离。研究结果可为未来 IMT 系统设计与部署、5G 或相关频率规划提供借鉴。

关键词: 兼容性分析; 5G; 大阵列天线; 地球站; 1.4 GHz

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018009

A simulation method for compatibility between IMT-2020 base station with array antenna and DAB earth station

HE Tianqi¹, WANG Tan², QIAN Zhaojun², LIU Peng¹

1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China

2. The State Radio Monitoring Center/The State Radio Spectrum Management Center, Beijing 100037, China

Abstract: The array antenna model and its parameters in ITU-R REC M.2101 were introduced in detail, and the model would be implemented in IMT deployment scenario modeling. Based on the lumped interference assessment method, the interference of the large-scale base station deployment to the central earth station at different distances was simulated, and the distance was protected by comparing the interference threshold. The research results can provide reference for future IMT system design and deployment, 5G or related frequency planning.

Key words: interference analysis, 5G, array antenna, earth station, 1.4 GHz

1 引言

频谱资源是国际移动通信 (International Mobile

Telecom, IMT) 产业发展的基础, 随着业务需求的不断增长, 频谱需求缺口持续增加^[1]。我国预计 2020 年 5G 开始正式商用, 目前正处于预备阶

收稿日期: 2017-05-15; 修回日期: 2017-08-30

基金项目: 国家科技重大专项“新一代宽带无线移动通信网”课题“IMT-2020 候选频段分析与评估”(No.2015ZX03002008)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Special Project of China (IMT-2020 Candidate Frequency Bands Analysis and Evaluation) (No.2015ZX03002008)



段。如何合理且高效地利用频谱资源是正式部署 IMT 产业前必须重点考虑的问题之一^[2]。2017 年 2 月,国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU) WP5D 发布了关于 5G 移动通信技术兼容共存分析的建模与仿真建议书 ITU-R M.2101^[3]。该建议书确定了未来 5G 系统将要使用的 IMT 系统(重点是 IMT-Advanced 与 IMT-2020 系统,即 4G 与 5G 系统)与其他无线电系统的兼容共存分析方法,具有重大意义。未来 5G 频谱规划的兼容共存研究均需以此作为主要研究依据。

数字音频广播(digital audio broadcast, DAB)是卫星广播业务(broadcasting-satellite service, BSS)中的一种业务类型,它利用空间电台发送或转发信号,以供公众直接接收(包括个体接收和集体接收)多媒体信息(包括文字、数据、图片、影像等)的无线电通信业务。根据《中华人民共和国无线电频率划分规定》^[4],在卫星通信领域,L 频段(频率范围在 1~2 GHz 的无线电频段)是我国数字音频广播业务的重要使用频段。关于 L 频段卫星广播业务的频段划分情况见表 1。

根据中国提交 ITU 的最新研究结果^[5],我国未来 IMT 系统在 6 GHz 以下频谱需求为 808~1 078 MHz,暂不包含 L 频段。但是,由于全球范围内许多国家和地区均存在 L 频段的 IMT 使用规划,且根据 IMT-2020(5G)系统愿景^[6],不排除未来我国扩增频谱的可能。未来 5G 将包括增强的移动宽带、低时延高可靠、海量机器通信等场景。其中后两个场

景重点针对垂直行业,即物联网应用。因此,可以预见,在全球范围内 L 频段是未来 IMT 演进系统使用的重要候选频段之一,研究 L 频段的 IMT 系统与其他系统的兼容性是有必要的。

当前,在 L 频段,有关 IMT 系统与其他系统业务的兼容共存研究并没有引入基于大阵列天线的系统级仿真,更没有使用 ITU M.2101 建议书后的结果更新。故本文出于研究性的考虑,基于 ITU-R 现有建议书和报告以及 WP5D、WP4A、TG5/1 的最新会议文件^[7,8],对使用 ITU-R M.2101 参数的 IMT 系统下行干扰 L 频段 DAB 地球站的场景建立兼容共存分析仿真,并最终给出干扰结果。

2 系统建模

2.1 干扰场景

本文重点研究将 IMT 作为干扰系统、其他系统或业务被视为被干扰系统的场景。IMT 系统的干扰又进一步分为基站干扰与终端干扰。研究经验表明,考虑到终端高度通常较低、发射功率相对较低(使用功率控制算法)、具有手持损耗等因素,IMT 系统的干扰主要来自基站下行干扰。

本文中,被干扰系统是接收卫星信号的 DAB 地球站,也就是说 IMT 系统干扰的是 DAB 的下行信号。分析的干扰类型为同频干扰,工作频率选取地面数字音频广播频率 1 479.5 MHz(我国于 2015 年发布通知将 1 447~1 467 MHz 作为宽带专

表 1 关于 L 频段卫星广播业务的频段划分情况

我国部分无线电频率划分			ITU 3 区无线电频率划分
中国内地	中国香港	中国澳门	
1 452~1 467 MHz 固定 移动 广播 卫星广播	1 466~1 480 MHz 广播 移动	1 452~1 492 MHz 固定 移动 广播 卫星广播	1 452~1 492 MHz 固定 移动 广播 卫星广播
1 467~1 492 MHz 固定 移动 卫星广播	1 480~1 518 MHz 固定		

网通信使用^[9])。相关建议书具体使用情况: IMT 基站天线模型采用 M.2101, IMT 基站发射功率及其部署场景采用 ITU-R REP M.2292^[10], 路径损耗模型采用 ITU-R REC P.1546^[11]。

2.2 5G 参数

系统建模中涉及的 5G 相关参数有大阵列天线模型和基站部署模型。

2.2.1 大阵列天线模型

波束成形技术被认为是 5G 系统区别于以前 IMT 系统的关键技术指标。阵列天线通过调整其每个阵元的增益加权系数, 最终复合生成具有明显指向性的波束。对于基站来说, 主波束通常指向用户终端, 所以对距离较远的 DAB 地球站的干扰主要来自旁瓣。

图 1 是波束成形天线的几何模型^[12]。y-z 平面表示阵列天线面板, x 轴为面板法线。主波束在 x-y 平面的投影与 x 轴的夹角为 φ , 与 z 轴的夹角为 θ 。

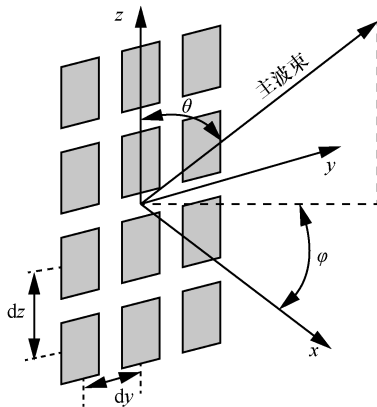


图 1 波束成形天线几何模型

M.2101 采用 3GPP 提供的增强多天线系统 (advanced antenna system, AAS) 天线模型^[13], 详细建模过程见式 (1) ~ 式 (6)。

天线阵元的水平辐射模型为:

$$A_{E,H}(\varphi) = -\min \left[12 \left(\frac{\varphi}{\varphi_{3\text{ dB}}} \right)^2, A_m \right] \quad (1)$$

天线阵元的垂直辐射模型为:

$$A_{E,V}(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta - 90}{\theta_{3\text{ dB}}} \right)^2, \text{SLA}_V \right] \quad (2)$$

由式 (1) 和式 (2) 得到天线阵元模型为:

$$A_E(\varphi, \theta) = G_{E,\text{max}} - \min \{ -[A_{E,H}(\varphi) + A_{E,V}(\theta)], A_m \} \quad (3)$$

式 (1) ~ 式 (3) 中, A_m 为天线前后比, SLA_V 为旁瓣电平极限, $\varphi_{3\text{ dB}}/\theta_{3\text{ dB}}$ 为阵元水平/垂直半功率角, $G_{E,\text{max}}$ 为天线阵元增益。

转向因子计算式为:

$$v_{m,n} = \exp \left\{ i \cdot 2\pi \left[(n-1) \cdot \frac{d_V}{\lambda} \cdot \cos \theta + (m-1) \cdot \frac{d_H}{\lambda} \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi \right] \right\} \quad (4)$$

重量因子计算式为:

$$w_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{N_H N_V}} \exp \left\{ i \cdot 2\pi \left[(n-1) \cdot \frac{d_V}{\lambda} \cdot \sin \theta_{\text{tilt}} - (m-1) \cdot \frac{d_H}{\lambda} \cdot \cos \theta_{\text{tilt}} \cdot \sin \varphi_{\text{escan}} \right] \right\} \quad (5)$$

由式 (3) ~ 式 (5) 最终得到波束成形天线模型为:

$$A_A(\varphi, \theta) = A_E(\varphi, \theta) + 10 \lg \left[1 + \rho \cdot \left(\sum_{m=1}^{N_H} \sum_{n=1}^{N_V} w_{m,n} \cdot v_{m,n} \right)^2 - 1 \right] \quad (6)$$

式 (4) ~ 式 (6) 中, v 和 w 分别表示转向因子和重量因子, N 为水平或垂直方向上天线阵元的数量, m/n 为水平/垂直方向的阵元编号, θ_{tilt} 为电子下倾角, φ_{escan} 为电子水平转向角, d 为水平或垂直方向的阵元间距, ρ 为相关系数。由上述计算式可以发现, 转向因子和重量因子主要受天线阵元位置关系影响, 而电子下倾角和电子水平转向角由天线面板法线与接收端的相对位置所决定。



2.2.2 IMT 基站参数

随着 M.2101 的正式发布, ITU-R 在 WP5D 第 26 次会议上同步形成了用于 5G 高频段 IMT 系统兼容共存分析相关参数^[7]。但目前 ITU-R 并未对 6 GHz 以下频段的各项参数提出更新, 所以本文中除基站天线配置外, 其余参数仍参考传统 IMT 系统所使用的 ITU-R REP M.2292。详细数据见表 2。

表 2 6 GHz IMT 系统参数

场景类型	乡村
工作频段/MHz	1 479.5
基站特性	
小区半径/km	5
天线高度/m	30
分区类型	单扇区
天线物理下倾角	10°
发射功率	43 dBm/5 MHz
基站天线属性	
天线模型	见式 (1)~式 (6)
天线规格 ($N_V \times N_H$)	8×8
$G_{E,max}/dBi$	5
$\phi_3/dB/\theta_3/dB$	65°
$A_m/SLA_V/dB$	30
d	0.5 λ
馈线损耗/dB	3
用户特性	
天线高度/m	1.5

2.3 地球站参数

为了使仿真结果更具有普适性, 地对地的干扰场景通常会将地球站的天线类型设置为全向天线考虑, 接收天线增益为 0, 即只计算信号干扰到接收端前的数值, 且以功率通量密度 (power flux density, PFD) 的形式呈现。由于并不考虑接收端的天线模型及其增益, 仿真仅涉及 DAB 地球站的天线高度, 具体见表 3。

表 3 1.4 GHz DAB 系统参数

参数	取值
工作频段/MHz	1 479.5
天线高度/m	5

2.4 路径损耗参数

根据干扰场景工作频段的需求以及 ITU-R SG3 要求, 路径损耗模型选用 ITU-R P.1546 的 30~3 000 MHz 频率范围内地面业务点对面预测的方法。模型配置见表 4。

表 4 1.4 GHz IMT-DAB 路损模型

配置参数	取值
路径损耗模型	P.1546
路径类型	陆地
工作频率/MHz	1 479.5
时间概率	1%、10%、20%、50%
区域概率	50%
发射端天线高度/m	30
发射端杂散高度/m	10
接收端天线高度/m	5
接收端杂散高度/m	2

3 链路计算

根据 ITU-R REP M.2292 的参数设定, 场景为乡村且工作频率为 1~2 GHz 的基站小区半径大于 3 km, 用于兼容共存研究的典型值为 5 km。假设 IMT 基站干扰 DAB 地球站的场景示如图 2 所示, 基站沿圆环按站间距 ($ISD=8.65$ km) 部署, 即半径为 d km 的圆环上部署 $2\pi d/ISD$ 个基站。

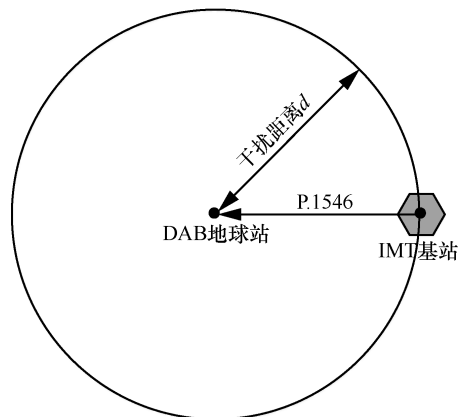


图 2 干扰场景示意

根据 ITU-R REC M.2101 的参数设定, IMT 基站的天线面板水平方向均匀分布, 垂直方向固定 10° 物理下倾。用户设备均匀分布在以基站为中心、半径为 1 000 m 的圆形区域内。每次仿真快照, 基站天线调度 (指向) 其板面正前方 120° 范围内 1 个用户。

由于基站天线具有 10° 的物理下倾角, 每当天线波束成形后的主波束指向用户时, 主波束相对于面板法线之间的物理离轴角、电调倾角实际上都是建立在以天线面板为 y - z 平面的坐标系上, 并非水平空间上的直角坐标系, 所以需要进行离轴角修正。修正公式推导过程详见 ITU-R REC F.1336^[14]。

电调倾角修正:

$$\theta_e = \begin{cases} \frac{90 \cdot (\theta_h + \beta)}{90 + \beta}, & \theta_h + \beta \geq 0 \\ \frac{90 \cdot (\theta_h + \beta)}{90 - \beta}, & \theta_h + \beta < 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, θ_e 为修正后的电子下倾角; θ_h 为从天线位置的水平面上测量到的俯仰角 (90° 是天顶点, 而 -90° 是天底点); β 为物理下倾角, 主波束轴低于天线位置处的水平面的正角度。

物理倾角修正:

$$\begin{aligned} \theta &= \arcsin(\sin \theta_h \cos \beta + \sin \theta_h \cos \varphi_h \sin \beta) \\ \varphi &= \arccos\left(\frac{-\sin \theta_h \sin \beta + \cos \theta_h \cos \varphi_h \cos \beta}{\cos \theta}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, θ 为从天线最大增益轴和辐射图围绕其倾斜的轴所确定平面测量到的俯仰角; φ 为从天线最大增益轴和辐射图围绕其倾斜的轴所确定的平面测量到的方位角; φ_h 为从最大增益方位测量到的天线位置处水平面中的方位角 ($-180^\circ \sim 180^\circ$)。

通过仿真基站信号下行, 即天线主波束指向用户时, 天线旁瓣会对一定距离外的 DAB 地球站产生信号干扰, 得到基站与 DAB 地球站连线方向

上的辐射功率值。

某干扰距离的单个基站的等效全向辐射功率 (e.i.r.p) 的计算式为^[15]:

$$\text{e.i.r.p(dB/4 kHz)} = P_{\text{tx}} + G_{\text{tx}} + P_0 \quad (9)$$

其中, P_{tx} 为基站发射功率, 单位为 dB; G_{tx} 为基站天线增益, 单位为 dB, 位于同一干扰距离的天线增益服从该干扰距离产生的基站天线增益分布 (如图 4 所示); P_0 为基站天线馈线损耗, 单位为 dB。

某干扰距离的一圈基站的干扰 I 计算式为:

$$I(\text{dB/4 kHz}) = 10 \times \lg \sum_{i=1}^N 10^{(\text{e.i.r.p} + \text{PL})/10} \quad (10)$$

其中, PL 为路径损耗, 单位为 dB, 采用 ITU-R REC P.1546 模型; N 为该圈的最大基站数目。

根据 ITU-R REC P.1546 的参数设定, 添加链路损耗, 得到在超过某一时间概率下的接收端处 (增益为 0 的全向天线接收) 的场强值或辐射功率值。

4 IMT-2020 基站干扰 DAB 地球站

4.1 天线模型

通过 MATLAB 画出 8×8 阵列天线增益 ($\theta_{\text{tilt}} = 0^\circ$, $\varphi_{\text{scan}} = 0^\circ$), 如图 3 所示。天线增益的最大值为 23.16 dBi。图 3 表示当用户终端位于阵列天线面板正前方时的天线状态, 如果用户位置发生改变, 天线方向图也会随之变化, 最大增益值会略微下降。

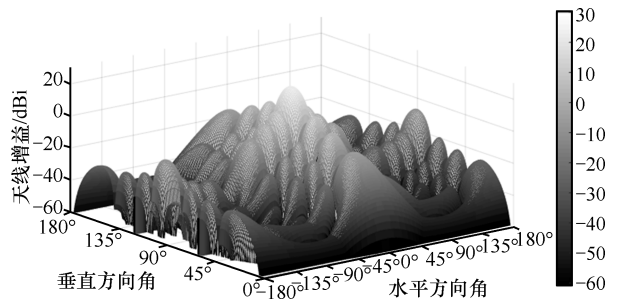


图 3 8×8 阵列天线增益 (3D)



4.2 天线增益

在兼容共存研究中, 5G 区别于以前研究周期的最主要影响是 ITU-R M.2101 建议书中天线模型的改变。在此给出了干扰链路计算中发射端天线增益的影响作为中间结果。图 4 为仿真快照 10 000 次, 乡村场景下的 8×8 阵列天线 IMT 基站(天线含 10° 物理下倾), 指向距离其 10 km 处某系统的天线增益累积分布曲线。

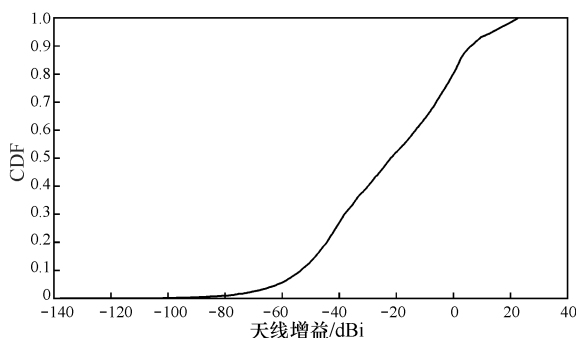


图 4 干扰链路的基站天线增益累计分布 (干扰距离 10 km)

由图 4 可知, 在引入阵列天线和波束成形算法之后, 即便在 IMT 基站部署位置已定的前提下, 其指向其他系统固定方向的天线增益也是动态变化的。图 4 中天线增益均值为 6.25 dBi, 且有 80% 的概率小于 0, 与峰值 22.67 dBi (由于有 10° 的物理下倾角影响) 相比显著较小。根据此例可以看出, 波束成形技术在缓解系统间干扰方面具有优势。

4.3 集总干扰

首先需要考虑 P.1546 路径损耗模型存在的时间维度和地理位置维度的可变性, 所以第一步要对某干扰距离的单个基站仿真 1%、10%、20%、50% 时间下, 50% 地理位置概率的干扰值。然后, 因为 IMT 基站的波束成形技术也为干扰带来了一定随机性, 即每次快照的每个基站的主波束指向以及其带来的干扰行为均不相同, 所以需要统计每一次快照的集总干扰结果 (参考式 (10)), 并利用蒙特卡洛方法进行分析。

对于某一干扰距离, 本文使用 10 000 次快照的平均集总干扰和超过其 99% 的集总干扰功率通

量密度作为 IMT 系统干扰 DAB 地球站的理想结果和恶劣结果。图 5 是平均集总干扰下, 到达接收天线处的 PFD 与干扰距离的关系曲线。

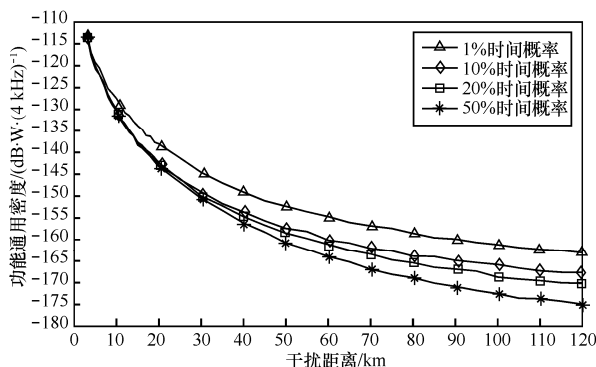


图 5 到达地球站的功率通量密度与干扰距离的关系曲线

由 ITU-R WP4A 的最新联络函可知, 1.4 GHz 频段 DAB 地球站 (全向天线接收) 的干扰门限为 $-155.4 \text{ dB (W/4 kHz)}$ [8]。所以从图 5 可以看出, 时间概率为 1% 时的 DAB 地球站保护距离为 60 km, 时间概率为 10% 时的保护距离 43 km, 时间概率为 20% 时的保护距离为 40 km, 时间概率为 50% 时的保护距离大约为 38 km。目前, 卫星广播业务的兼容共存分析还没有引入大阵列天线模型。以往的兼容性分析研究通常是基于干扰最坏的情况考虑, 即所有 IMT 基站天线主波束均指向中心地球站。于是, 图 6 给出了新旧两种建模方法的结果比较。

此外, 本文还对 IMT-Advanced 使用的 ITU-R M.2292 单扇区天线模型, 即 ITU-R F.1336 建议第 2.1 节中的模型 ($k=0.7$), 与 5G 未来使用的 M.2101 大阵列天线模型进行了比较。当干扰场景、天线最大增益均相同时, 基于两种天线模型的基站平均集总干扰 (理想干扰) 如图 7 所示。

从图 6 和图 7 可以看出, 对于不同时间概率的干扰结果, 引入大阵列天线后的模型相比于传统场景模型在缓解干扰方面有明显的改善。当 IMT 基站距离 DAB 地球站大于 20 km 时, 采用 M.2101 的两种干扰结果相比最坏干扰结果有大于 10 dB 的余量, 并且随着距离的增加而扩大。另外, 在相同的干扰距离下, 5G 的大阵列天线相

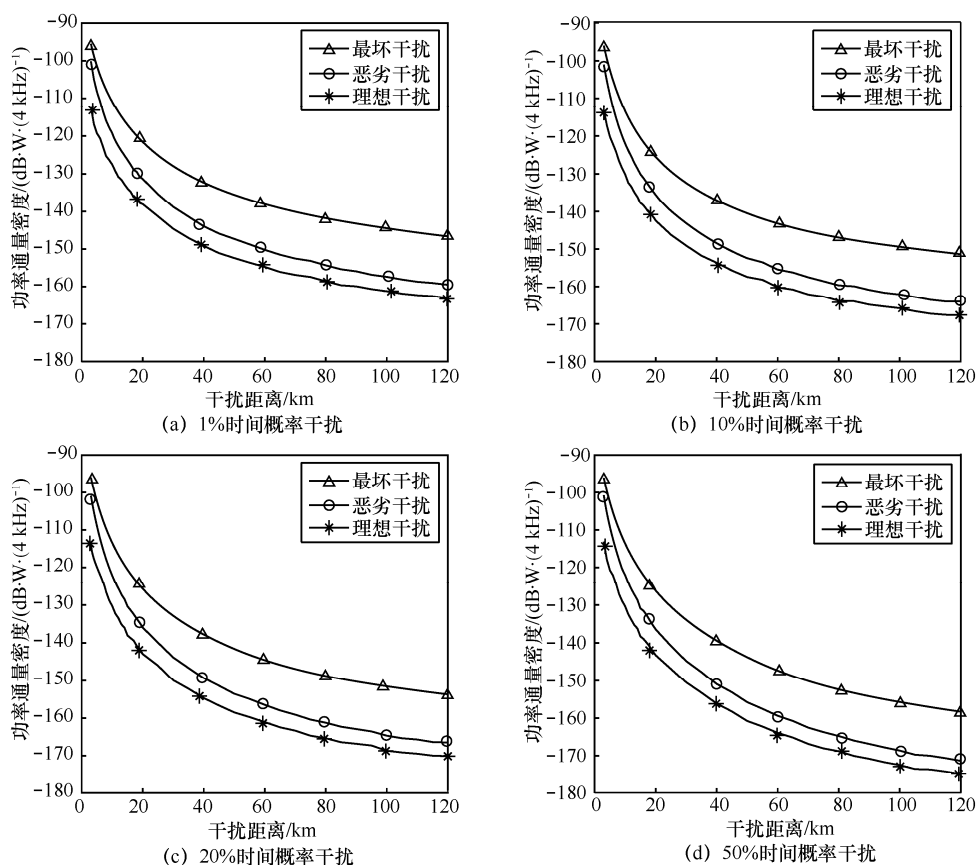


图6 IMT系统干扰L频段BSS地球站的干扰结果

比传统 IMT-Advanced 使用的天线模型所产生的干扰值更小, 有利于 IMT 基站更大范围的部署。本仿真结果实际上不仅适用于该 DAB 地球站的保护距离计算, 还可应用于其他具有相同天线高度、同频段的系统。

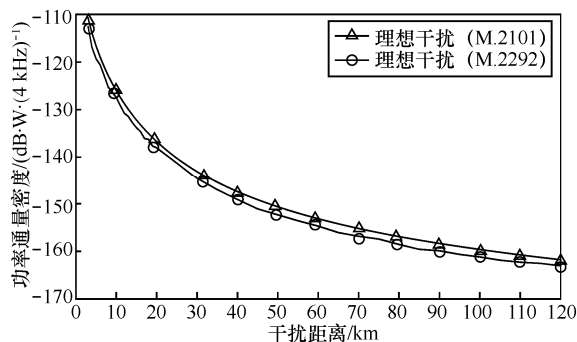


图7 基于不同天线模型的干扰结果比较(1%时间概率)

5 结束语

本文通过仿真 ITU-R M.2101 建议书 5G 系统

IMT 基站部署模型及大阵列天线模型, 改进现有广播卫星业务(数字音频广播)共存研究模型, 模拟出安装大阵列天线的 IMT 基站下行对中心地球站的干扰情况, 并得到其保护距离。至此, ITU-R M.2101 建议书已成为 5G 与其他系统兼容共存研究的重要研究基础。为了得到 5G 系统真实的表现情况, 未来的频谱资源管理、兼容共存分析以及对现有通信系统的升级改造等问题, 都需要落实该规则。虽然目前我国 L 频段尚不作为 5G 发展的需求频段, 但考虑到全球范围 L 频段的规划情况、我国未来 5G 频谱扩增的可能性以及邻国频谱协调等问题, L 频段的 IMT 兼容共存研究仍有一定的必要性。本文可为未来频谱规划工作提供借鉴。

参考文献:

- [1] 方箭, 朱颖, 郑娜, 等. 从 WRC-19 议题看 5G 与未来移动通信发展趋势[J]. 电信科学, 2016, 32(6): 65-72.



- FANG J, ZHU Y, ZHENG N, et al. A look at 5G and future mobile communication development trend from the point of WRC-19 agenda items[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(6): 65-72.
- [2] 方箭, 李景春, 黄标, 等. 5G 频谱研究现状及展望[J]. 电信科学, 2015, 31(12): 111-118.
- FANG J, LI J C, HUANG B, et al. Review and prospect on the research of 5G spectrum[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(12): 111-118.
- [3] ITU-R. Modelling and simulation of IMT networks for use in sharing and compatibility studies[R]. 2017.
- [4] 中华人民共和国工业和信息化部. 中华人民共和国无线电频率划分规定[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- Ministry of industry and information technology of the People's Republic of China. Radio frequency division regulations of the People's Republic of China[M]. Beijing: Posts&Telecom Press, 2014.
- [5] ITU-R. China (People's Republic of) spectrum needs for the terrestrial component of IMT in the frequency range between 24.25 GHz and 86 GHz for WRC-19 agenda item 1.13[R]. 2017.
- [6] 中国无线电. IMT-2020(5G)推进组发布 5G 技术白皮书[J]. 中国无线电, 2015(5).
- China Radio. IMT-2020 (5G) promotion group released 5G technology white paper[J]. China Radio, 2015(5).
- [7] ITU-R. Characteristics of terrestrial IMT systems for frequency sharing/interference analyses in the frequency range between 24.25 GHz and 86 GHz[R]. 2017.
- [8] ITU-R. FSS/BSS technical parameters for sharing studies under WRC-19 agenda item 1.13[R]. 2016.
- [9] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业和信息化部关于 1447-1467 兆赫兹(MHz)频段宽带数字集群专网系统频率使用事宜的通知[Z]. 2015-02-26.
- Ministry of industry and information technology of the People's Republic of China. Notice on the 1447-1467 megahertz (MHz) band for broadband digital trunk special network system[Z]. 2015-02-26.
- [10] ITU-R. Characteristics of terrestrial IMT-Advanced systems for frequency sharing/interference analyses[R]. 2013.
- [11] ITU-R. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz[R]. 2013.
- [12] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and universal terrestrial radio access (UTRA; radio frequency (RF) requirement background for active antenna system (AAS) base station(BS): TR37.842 V13.0.0[S]. 2013.
- [13] 3GPP. Study of radio frequency (RF) and electromagnetic compatibility (EMC) requirements for active antenna array system (AAS) base station: TR37.840 V12.1.0[S]. 2013.
- [14] ITU-R. Reference radiation patterns of omnidirectional, sectoral and other antennas for the fixed and mobile services for use in sharing studies in the frequency range from 400 MHz to about 70 GHz[R]. 2014.
- [15] 钱肇钧, 王坦, 康龙, 等. 25.25~27.5GHz 频段卫星间业务与 IMT 系统兼容性研究[J]. 电信科学, 2016, 32(12): 86-92.
- QIAN Z J, WANG T, KANG L, et al. Compatibility study between IMT and inter-satellite service system in 25.25-27.5 GHz frequency band[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(12): 86-92.

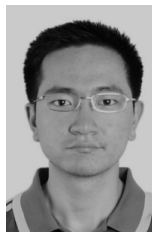
[作者简介]



何天琦 (1993-), 男, 华北电力大学硕士生, 主要研究方向为无线通信信道建模、系统间干扰共存等。



王坦 (1985-), 男, 博士, 国家无线电监测中心高级工程师, 主要研究方向为频率规划、频率评估和 5G 频率管理等。



钱肇钧 (1984-), 男, 国家无线电监测中心工程师, 主要研究方向为无线电波传播、系统间电磁兼容、5G 新技术发展、大规模 MIMO 的相关技术等。



刘鹏 (1992-), 男, 华北电力大学硕士生, 主要研究方向为无线通信网络与新技术、铁路无线通信系统频率规划等。