

# 基于比吸收率约束的多天线预编码设计

梁学俊<sup>1</sup> 吴震<sup>1</sup> 李微<sup>2</sup> 黄莹<sup>1</sup>

(国家信息网络产品质量监督检验中心 苏州 215104)<sup>1</sup> (东南大学计算机科学与工程学院 南京 211102)<sup>2</sup>

**摘要** 以比吸收率为约束条件、系统总速率最大化为目标,提出两种适用于多天线上行系统的预编码设计方案。该方案在提高系统频谱效率的同时,兼顾了比吸收率对传输功率的影响,从而将比吸收率约束提前到系统设计和优化之中,减少了后期对比吸收率的评估依赖。仿真结果表明两种算法不仅保证了比吸收率在最大允许范围内,而且大大提升了系统性能。

**关键词** 多输入多输出,比吸收率,预编码

中图分类号 TP914 文献标识码 A

## Multi-antenna Precoding Design Based on SAR Constraint

LIANG Xue-jun<sup>1</sup> WU Zhen<sup>1</sup> LI Wei<sup>2</sup> HUANG Ying<sup>1</sup>

(National Quality Supervision and Testing Center for Information Network Product, Suzhou 215104, China)<sup>1</sup>

(School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211102, China)<sup>2</sup>

**Abstract** This paper proposed two novel precoding schemes to maximize the system sum-rate under the constraint of Specific Absorption Rate(SAR) for MIMO uplink system. These schemes not only maximize the system spectral efficiency, but also take the SAR impact on the transmit power into account. This paper brought the SAR constraint into system resource optimization early so as to reduce the burden introduced by SAR measurement and test work. Simulation results show that these schemes could fulfill the SAR under the limit, meanwhile greatly improve system performance.

**Keywords** MIMO, SAR, Precoding

### 1 引言

随着无线通信技术的发展,人们日益暴露于各种频率、各种强度的电磁场之中,电磁辐射已成为一种新型、特殊的环境污染,特别是手机的电磁辐射对人类健康的影响已经引起人们的极大关注。这类设备使用时贴近人的脸或身体,当人体吸收的电磁辐射功率超过一定限值时,便会产生不良影响。国内外普遍采用比吸收率(SAR)来评估电磁辐射对人体的影响。SAR 定义为单位时间内单位质量的人体组织所吸收的电磁辐射能量,公式表示为:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho}$$

式中,  $\sigma$  是组织的电导率(Siemens/m),  $E$  是电场强度(RMS)能量(Volts/m),  $\rho$  是组织的质量密度(kg/m)。我国制定的国标 GB 21288-2007《移动电话电磁辐射局部暴露限值》规定,手机电磁辐射比吸收率不得超过 2.0Watt/kg。

以 LTE/LTE-Advanced 为代表的新一代无线通信设备大量采用多天线(MIMO)技术<sup>[1]</sup>。这些多天线发射机往往在同一时间工作,不可避免地增加了电磁辐射,对比吸收率的约束提出了更高的挑战。另外,在多天线和多发射机的情形下,

系统往往以优化频谱效率为目标,却忽视了对比吸收率的影响,直到设备测试阶段才进行最后评估。这些因素使得对集成多天线和多发射机的无线通信设备进行比吸收率的约束和设计提出了更高的挑战。文献<sup>[2-4]</sup>列出了对带有多发射机和多天线的手持设备进行比吸收率评估的测量方法。此外,文献<sup>[5,6]</sup>分别研究了平面分集天线和相控阵对于比吸收率的影响;文献<sup>[7]</sup>经过模型构建与实际的测量,指出对于两天线系统,比吸收率是天线间相位差的函数。然而,上述文献仅仅给出了比吸收率测量或者基于天线设计减少比吸收率的方法,并未考虑比吸收率约束下的系统容量优化问题。实际上,将比吸收率的约束提前到系统设计中来,不仅可以提高后期比吸收率评估效率,而且可以进一步优化系统性能。本文以文献<sup>[7]</sup>比吸收率模型为基础,在多天线上行系统中,提出了两种 SAR 约束的预编码设计,两种算法在最大化系统频谱效率的同时,兼顾了 SAR 的影响,从而实现了将比吸收率性能约束提前到系统设计和优化中,最终提升了系统的性能。

### 2 系统模型

多天线上行系统如图 1 所示,用户侧  $M$  根发送天线,基站侧  $N$  根接收天线。信道服从零均值循环对称复高斯信道

本文受国家质检总局 2013 年度科技计划项目:新一代无线通信产品电磁辐射的比吸收率测试(2013QK198)资助。

梁学俊(1979-),男,博士生,高级工程师,主要研究方向为宽带移动通信、电磁辐射检测;吴震(1967-),男,高级工程师,主要研究方向为电磁兼容技术;李微(1969-),男,副教授,主要研究方向为虚拟仪器技术和自动化测试;黄莹(1987-),女,工程师,主要研究方向为电磁辐射测试。

(ZMCSG)模型, 基站的接收信号  $y \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  表示为:

$$y = hf_x + z \quad (1)$$

其中,  $x$  为传输符号, 服从均值为 0、方差为 1 的复随机分布, 满足  $E[\|x\|^2] = 1$ 。  $h \in \mathbb{C}^{N \times M}$  为信道增益矩阵,  $f \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  为预编码矢量,  $z$  为加性白高斯噪声, 服从均值为 0、方差为 1 的复高斯分布。假定用户传输功率限制为  $P$ , 则

$$\|f\|^2 \leq P_{\max} \quad (2)$$

此时, 系统信道容量表示为:

$$R = \max_{\|f\|^2 \leq P_{\max}} \log\left(1 + \frac{\|hf\|^2}{\sigma^2}\right) \quad (3)$$

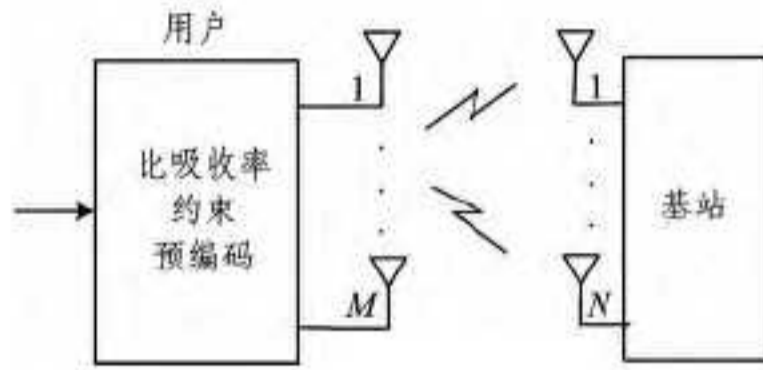


图1 多天线上行系统框图

### 3 算法描述

根据文献[7]的测量结果, 比吸收率与两天线传输符号的绝对相位无关, 却与其相位差存在如下关系:

$$SAR = P * (r_1 + r_2 * \cos(\varphi_0 + \theta)) \quad (4)$$

式中,  $P$  为用户传输功率, 单位为 Watt,  $r_1$  和  $r_2$  为正参数, 单位为  $\text{kg}^{-1}$ ,  $\varphi_0$  是与天线配置相关的参数。基于文献[7]中的最小方差估计方法, 计算出  $r_1 = 4.6050$ ,  $r_2 = 2.6250$ ,  $\varphi_0 = 0.78\pi$ 。显然地, 当  $\theta = 1.22\pi$  时, 比吸收率在给定传输功率时最大, 即是最差情形。本文利用文献[7]提出的等增益传输方案, 定义预编码矢量具有如下形式:

$$f = \sqrt{\frac{P}{2}} [1, e^{j\theta}]^T$$

式中,  $\theta$  即为式(1)系统下两发送天线之间发送符号的相位差,  $(\cdot)^T$  表示矩阵的转置, 而系数  $\sqrt{\frac{P}{2}}$  使得预编码矢量符合式(2)。基于以上描述, 本文提出了以下两种比吸收率约束的预编码设计算法。

#### 3.1 算法1

每次信道实现下的该算法描述如下:

1) 基于信道信息, 根据式(3), 在最大发送功率限制下, 以最大化信道容量为目标, 计算最优的预编码矢量  $f_{\text{optimal}}$ , 即

$$f_{\text{optimal}} = \arg \max_{\|f\|^2 \leq P} (R);$$

2) 根据式(4), 计算在最优的预编码矢量  $f_{\text{optimal}}$  下的比吸收率;

3) 如果比吸收率未超过规定限值  $SAR_{\text{limit}}$  时, 则式(3)得到的容量值即为系统信道容量, 否则进入步骤4);

4) 根据式(4)基于最优的预编码矢量  $f_{\text{optimal}}$  和规定限值  $SAR_{\text{limit}}$  重新计算最大允许传输功率  $P$ , 并利用式(3)重新计算在功率  $P$  的信道容量, 此时即为系统信道容量。

可以看出, 该算法首先基于式(3)确定最优预编码矢量, 然后基于式(5)在比吸收率约束下确定用户最大允许发送功率, 并执行功率退避算法。因此, 该算法以比吸收率作为约束条件优化了系统性能。

#### 3.2 算法2

每次信道实现下的该算法描述如下:

1) 基于信道信息, 根据

$$f_{\text{optimal}} = \arg \max_{\|f\|^2 \leq P} (P \cdot R) \\ = \arg \max_{\|f\|^2 \leq P} \left\{ \left( \frac{SAR_{\text{limit}}}{(r_1 + r_2 * \cos(\varphi_0 + \theta))} \right) \log\left(1 + \frac{\|hf\|^2}{\sigma^2}\right) \right\} \quad (5)$$

确定最优的预编码矢量;

2) 根据式(4), 计算在最优的预编码矢量  $f_{\text{optimal}}$  下的比吸收率;

3) 如果比吸收率未超过规定限值  $SAR_{\text{limit}}$ , 则式(3)得到的容量值即为系统信道容量, 否则进入步骤4);

4) 根据式(4)基于最优的预编码矢量  $f_{\text{optimal}}$  和规定限值  $SAR_{\text{limit}}$  重新计算最大允许传输功率  $P$ , 并利用式(3)重新计算在功率  $P$  的信道容量, 此时即为系统信道容量。

可以看出, 算法2基于式(5)确定最优预编码矢量, 然后基于式(4)在比吸收率约束下确定用户最大允许发送功率, 并执行功率退避算法。因此, 与算法1相比, 算法2的不同之处在于步骤1)。算法2在确定最优预编码矢量时, 不仅基于信道容量最大化, 而且以比吸收率约束下的发送功率最大化为优化目标。这样, 不仅将比吸收率作为约束条件, 而且最大化了用户发送功率, 从而进一步提升了系统的信道容量。

### 4 仿真结果

为了验证算法的性能, 进行了蒙特卡罗仿真。用户2根发送天线, 基站2根接收天线。信道矩阵每个元素服从均值为 0、方差为 1 的复高斯分布。为了对比算法1和算法2, 本文给出了一种基准设计, 即用户基于式(3)确定最优的预编码矢量, 但由于比吸收率的限制, 用户仅能以  $\theta = 1.22\pi$  时由

$SAR_{\text{limit}}$  决定的传输功率发送, 即  $P = \min\left\{\frac{SAR_{\text{limit}}}{r_1 + r_2}, P_{\max}\right\}$ 。

图2给出了传输功率为 1W 时系统信道容量与比吸收率限制  $SAR_{\text{limit}}$  的关系图。可以看出, 算法1和算法2相比基准设计的信道容量大大提高。比如, 当  $SAR_{\text{limit}} = 2\text{W/kg}$  时, 算法1相对基准设计提高了 48%, 算法2相对基准设计提高了 75%。与此同时, 算法2相对算法1信道容量提高了 18%, 从而验证了算法2的性能优于算法1; 而且随着  $SAR_{\text{limit}}$  的增加, 信道容量提高效果趋于显著。

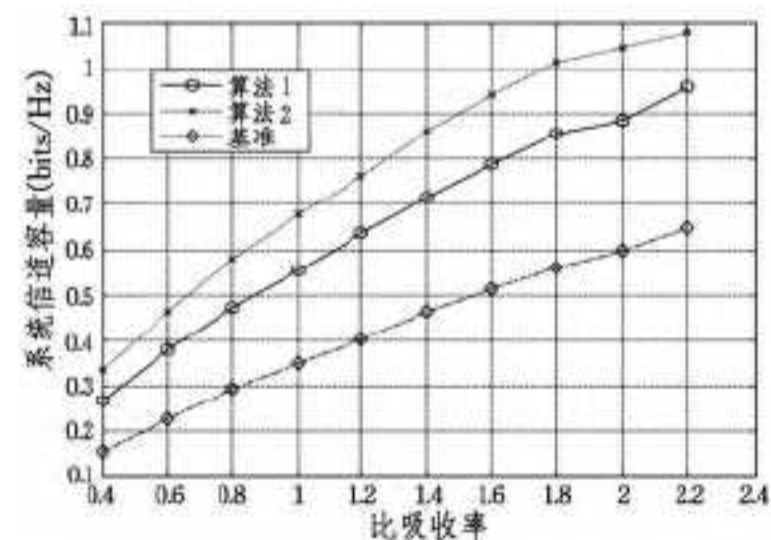


图2 系统信道容量与比吸收率约束关系图(传输功率为 1W)

图3示出了比吸收率为 2.0W/kg 时系统信道容量与传输功率限制的关系。可以看出, 算法1和算法2相比基准设计的信道容量大大提高。比如, 当传输功率为 1.2W 时, 算法1相对基准设计提高了 50%, 算法2相对基准设计提高了 78%。同时, 算法2相对算法1提高了 19%。随着传输功率的提高, 3种算法信道容量提升不明显, 这是由于比吸收率约束, 根据式(3), 实际传输功率并没有提高的缘故。

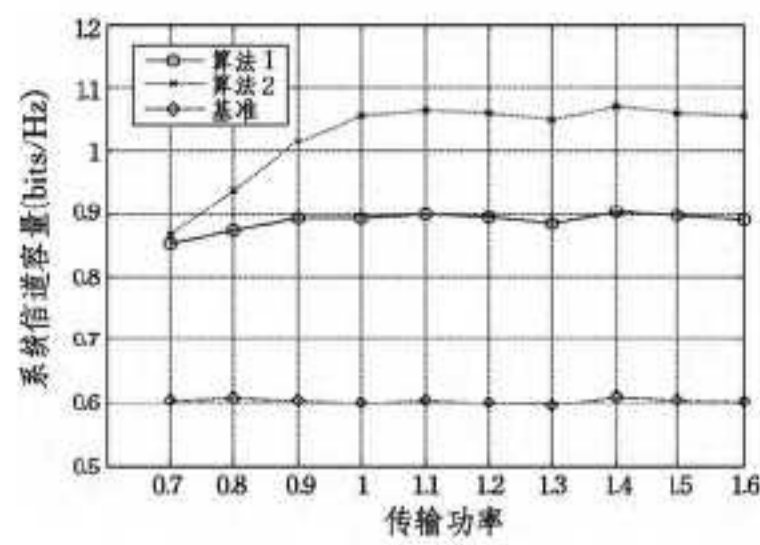


图3 系统信道容量与传输功率关系图(比吸收率限制为 2W/kg)

**结束语** 本文研究了适用于多天线上行系统中比吸收率约束下的预编码设计。根据文献[7]提出的比吸收率模型,基于等增益预编码机制,提出了两种新颖的在比吸收率限制下的预编码和传输功率设计机制。两种算法不仅实现了比吸收率在最大允许范围内,而且提升了系统信道容量,最重要的是,将比吸收率约束提前到系统设计中,减少了后期对比吸收率的评估依赖。但本文假定用户具有理想信道信息,因此在非理想信道信息下比吸收率约束的预编码机制是下一步的研究方向。

### 参考文献

[1] 3GPP TS 36.300 V11.6.0 Evolved Universal Terrestrial Radio

(上接第 275 页)

较高。我们将其作为迭代终止的标准。

C. 在实验中圆的半径和每一次迭代中圆心移动的距离选取对定位结果的影响较大,因此它们的选取对最终定位精度至关重要。本文中,经过反复试验,选取不同参数,并记下每次实验的结果,得到在迭代中选取圆的半径,圆心移动的长度为 20:1 较为合理。

**结束语** 布朗最小二乘三角定位对方位角是很敏感的,而虚拟力迭代法中信号源的传输范围计算很困难。布朗最小二乘三角定位的定位精度非常依附于方位角的精确度。虚拟力迭代法是利用一个圆形区域来估算真实干扰区域并反复移动圆形区域,迭代终止后的圆形区域的中心就是定位最终结果,但该方法没有分析质心定位的精度以及对原始数据进行处理,因此该方法并没有用于实际应用。为了解决这些问题,我们提出了一种基于方位角和网络拓扑的定位方法。此方法通过引入方位角误差权值对方位角进行剔除和修正,使得方位角的稳定性和准确性更高,用布朗最小二乘三角定位的定位结果作为迭代开始的初始信号源坐标更加合理,通过反复试验,根据实际情况我们给出了如何确定初始圆形区域的中心、迭代中圆形区域的半径以及圆的半径与圆心移动的长度的比值,最后也给出了实际应用中迭代终止的标准,使得该定位方法能够有效、准确地用于无线电智能监测系统中对干扰源进行定位。

本文仅仅提出了针对一个干扰源的定位方案,接下来的工作将针对电磁环境更加复杂和同时多个干扰源的情况进行研究。

### 参考文献

[1] 李婧,龚晓峰,张焯,等. 一种改进的 TDOA 概率定位算法及应用[J]. 四川大学学报,2010,47(3):515-519  
 [2] Wood A, Stankovic J, Son S. A jammed-area mapping service for sensor networks[C]// The 24th IEEE Real-Time Systems Sym-

Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description[S]. 2013

[2] 赵竞,许士君,齐殿元. 多天线同时发射设备电磁照射(SAR)测试研究[J]. 现代电信科技,2012,12:26-32  
 [3] 刘晓勇,阙润田,刘佳. 带有多发射机和多天线的手机比吸收率评估方法[J]. 电波科学学报,2011,26:150-153  
 [4] SAR evaluation considerations for handsets with multiple transmitters and antennas[R]. Tech. Rep. KDB648474. Federal Communications Commission,2008  
 [5] Douglas M, Okoniewski M, Stuchly M. A planar diversity antenna for handheld PCS devices[J]. IEEE Trans. on Veh. Technol., 1998,47(3):747-754  
 [6] Mangoud M, Abd-Alhameed R, McEwan N, et al. SAR reduction for handset with two-element phased array antenna computed using hybrid mom/fdtd technique[J]. Electronics Letters,1999, 35(20):272-275  
 [7] Chim K, Chan K, Murch R D. Investigating the impact of smart antennas on SAR[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 2004,52(5):1370-1374  
 [8] Love D J, Jr Heath R W. Equal gain transmission in multiple-input multiple-output wireless systems[J]. IEEE Trans. Comm., 2003,51(7):1102-1110

posium, 2003:286-297

[3] Want R, Hopper A, Falcao V, et al. The active badge location system[J]. ACM Transactions on Information Systems,1992,10 (1):91-102  
 [4] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications, 2000: 775-784  
 [5] Chen Ying-ying, Francisco J, Trappe W, et al. A practical approach to landmark deployment for indoor localization[C]// Proceedings of the Third Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), 2006:365-373  
 [6] Liu Hong-bo, Chen Ying-ying, Liu Zhen-hua, et al. Localizing jammers in wireless networks[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2009:1-6  
 [7] Cheng Tian-zhen, Li Ping, Zhu Sen-cun. An algorithm for jammer localization in wireless sensor networks [C]// The 26th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA), 2012:724-731  
 [8] 郝才勇,刘恒,刘宏立. 基于 TDOA 的卫星干扰源定位方法的研究[J]. 重庆邮电大学学报,2012,24(4):442-446  
 [9] Poisel Richard A. Electronic Warfare Target Location Methods [M]. 屈晓旭,罗勇,等,译. 北京:电子工业出版社,2008:26-28  
 [10] Brown R M. Emitter Location Using Bearing Measurements from a Moving Platform NRL Report 8483 [R]. Washington, DC:Naval Research Laboratory,1981  
 [11] Poisel P A. Introduction to Communication Electronic Warfare System [M]. Norwood: Artech House,2002:384-388  
 [12] 肖秀丽,唱亮. 测向交会定位精度分析[J]. 中国无线电,2011,6 (4):51-53  
 [13] 周鸿顺. 频谱监测手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2006:232-238