

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.09.001

一种短波 MIMO 系统模型及适用性分析*

关建新**,张 静,窦高奇

(海军工程大学 电子工程学院,武汉 430033)

摘 要:在现有 Gesbert 多输入多输出(MIMO)系统模型的基础上,结合短波天波信道的传播特点,建立了一种短波 MIMO 系统模型。所建立的模型是一种解析模型,可由接收天线相关矩阵、发射天线相关矩阵以及传播模式相关矩阵产生。通过对该模型进行适用性分析发现,其与实际 HF MIMO 系统的信道矩阵具有相同的秩特性。该模型避免了直接测量 HF MIMO 信道矩阵的复杂性和局限性,可以用于进行 HF MIMO 系统容量计算。

关键词:短波通信;多输入多输出;系统模型;适用性分析

中图分类号:TN926 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)09-1119-07

HF MIMO System Modeling and its Applicability Analysis

GUAN Jian-xin,ZHANG Jing,DOU Gao-qi

(College of Electronic Engineering,Naval University of Engineering,Wuhan 430033,China)

Abstract:A high frequency(HF) multiple input multiple output(MIMO) system model is established based on the existing Gesbert MIMO model. It adequately considers the propagation characteristic of HF communication. This HF MIMO model is analytical and can be decomposed into the corresponding correlation coefficients matrix of receiving antennas, transmitting antennas and propagating modes. After sufficient applicability analysis, it is found that this model shows the same rank as the actual HF MIMO system. This model avoids the complexity and shortage of directly measuring the HF MIMO channel matrix and can be used to compute the capacity of HF MIMO system.

Key words:HF communication; multi-input multi-output(MIMO); system model; applicability analysis

1 引 言

短波通信是指频率范围为 3~30 MHz 的无线电通信,也称高频(High Frequency, HF)通信,其主要特点是能以不高的代价实现远距离通信,但长期以来短波通信的性能一直受限于时变、色散的天波信道特性,导致通信可靠性差、数据传输速率不高(一般小于等于 2.4 kb/s),因而限制了许多业务的应用,迫切需要采用通信领域的最新技术来提高短波通信的性能,尤其是提高其传输速率。

多输入多输出(Multiple Input Multiple Output,

MIMO)技术能够在不增加系统带宽和总发射功率的前提下极大地提高无线通信系统的容量和改善系统的误码率性能^[1-2],过去十几年来引起了无线通信领域的极大关注,可望被用来提升短波通信的性能。然而 MIMO 技术的应用需要收发天线之间的信道充分散射,因而现有的研究成果主要集中于容易获得充分散射信道的 VHF、UHF 和 SHF 频段。MIMO 技术在 HF 频段的应用方面,仅有英国莱斯特(Leicester)大学、达拉谟(Durham)大学和法国雷恩(Rennes)大学的研究小组取得了一定的研究成果。笔者已在文献[3]中对 2011 年之前 MIMO 技术应用于 HF 通

* 收稿日期:2013-03-18;修回日期:2013-07-15 Received date:2013-03-18;Revised date:2013-07-15

基金项目:海军工程大学自然科学基金资助项目(HGDQNJ110022,HGDQNJ11031)

Foundation Item:The Research and Development Fund of Naval University of Engineering (HGDQNJ110022,HGDQNJ11031)

** 通讯作者:jx_guan@sina.com Corresponding author:jx_guan@sina.com

信中的研究情况进行了综述,并归纳出了前期的研究主要集中在通过实验方式来验证 HF MIMO 的可行性上。2011 年之后公开发表的资料仅有文献[4-6],并且还是前期研究成果的总结与发表。本文拟在文献[3]所作研究的基础上更进一步,在调研现有 MIMO 模型的基础上,通过理论分析以及仿真验证,寻求一种可用于 HF MIMO 系统容量计算进而进行工作频率选择的信道模型。

全文的结构安排如下:第 2 节将调研现有的 MIMO 系统模型并根据 HF MIMO 系统的特点选取其中一种;第 3 节将结合短波通信的传输模式特点对 HF MIMO 系统进行建模;第 4 节对建立的 HF MIMO 模型进行适用性分析;第 5 节对全文的内容进行总结,并对 HF MIMO 系统模型的作用进行简单介绍。

2 MIMO 信道模型调研及分析

最早的 MIMO 信道模型是独立同分布(i.i.d.)的平坦瑞利衰落模型,这种模型对应于充分散射的窄带系统情形,是一种理想的情况,一般用于 MIMO 系统的理论容量计算。实际中由于 MIMO 系统天线单元间距有限与散射传播稀少等原因,往往导致了子信道的空间相关,同时宽带系统所面临的频率选择性也必须考虑进去。于是越来越多的 MIMO 传播模型被提了出来,大致来说,MIMO 系统模型可被分为物理模型和解析模型两大类^[7]。

物理模型以电磁波传播理论为基础,通过描述发射天线和接收天线之间的双向多径传播来刻画信道的特性,从而精确地建模了诸如复幅度、离开角(Angle of Departure, AoD)、到达角(Angle of Arrival, AoA)、多径时延等电波传播参数。一些更为复杂的物理模型也考虑了天线极化和信道时变的因素。物理模型可以实现无线电波传播的精确再现,但往往没有考虑天线配置(天线模式、天线数量、阵列的几何形状、极化、互耦)以及系统带宽的影响。

与物理模型相对应,解析模型以数学或解析的方式来刻画单个发射和接收天线间信道的冲激响应,而无需精确说明电波传播问题。解析模型在综合考虑 MIMO 信道矩阵特性与系统设计以及算法开发和验证中非常受欢迎,它可以被进一步分为基于传播的模型和基于相关的模型。基于传播的模型通过传播参数建模信道矩阵,典型例子如有限散射模型^[8]、最大熵模型^[9]以及虚信道表示法^[10]等。基于相关的模型以矩阵元素间的相关性来统计性地刻画 MIMO 信道矩阵,比较流行的基于相关的解析信道模型是 Kronecker 模型^[11-14]及其变形 Weichselberger 模型^[15]和 Gesbert 模型^[16]。需要注意的是, Gesbert

MIMO 信道模型是 Kronecker MIMO 信道模型在假定收发两端的相关矩阵可以分离时的改进,而 Weichselberger 信道模型是考虑了发射和接收天线阵列耦合时的 Kronecker 模型的变形。

分析可知,诸如射线跟踪之类的物理模型基于反射、散射、折射等电波传播理论,虽然可能比较精确,但是计算复杂度很高。HF 通信所用的电离层是一个各向异性的传播媒质,电子密度极不均匀,因而想要构建 HF MIMO 系统的物理模型将会非常复杂,暂且不作考虑。而诸如 3GPP 等标准中所给出的参考模型所适用的频段与 HF 频段有较大的差别,也不适用。鉴于解析模型无需考虑电波传播问题的特性,可以考虑用基于解析的相关模型来描述 HF MIMO 系统。基于空域相关的建模方法是统计建模的一种典型方法,这种建模方法易于仿真实现,且适用于不同的环境,具有广泛的适用性,因此得到了极大的关注。

基于收发两端阵元间功率相关系数的 METRA 模型^[17]和基于阵元间信号复相关系数的 SATURN 模型^[18](也即 Kronecker 信道模型)是两种典型的相关性建模方法。它假设发送和接收天线间相距足够远,且衰落信道有丰富散射,因此可以认为发送端与接收端是统计独立的,即两者之间不存在相关性,或者说空间中的发射相关和接收相关是可分离的,那么信道的空间复相关矩阵可以表示为如下的 Kronecker 乘积形式:

$$\mathbf{R} = E\{\mathbf{h}_R \mathbf{h}_R^H\} = \mathbf{R}_{Tx} \otimes \mathbf{R}_{Rx} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{R}_{Tx} = E\{\mathbf{H}^H \mathbf{H}\}$ 为发射天线阵元间的相关矩阵, $\mathbf{R}_{Rx} = E\{\mathbf{H} \mathbf{H}^H\}$ 为接收天线阵元间的相关矩阵,于是 Kronecker 模型可被表示为

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_{Tx}^{1/2} \mathbf{G} \mathbf{R}_{Rx}^{1/2} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{G}$ 是元素的均值为 0、方差为 1 的独立同分布复高斯变量的 MIMO 信道矩阵。显然,此模型需要确定发射相关矩阵和接收相关矩阵,涉及的实参数总数为 $n_R^2 + n_T^2$ 个。

上述的 Kronecker MIMO 模型虽然能够将收发两端的相关矩阵分离开,但是其没有考虑到收发天线阵列之间的散射体存在相关的情况, Gesbert 在此模型的基础上根据收发天线阵列之间的散射体存在相关的情形对 Kronecker 模型进行了改进,这就是 Gesbert MIMO 模型。Gesbert 在文献[16]中研究了室外的分布式散射 MIMO 信道模型,他假定发射端的散射体和接收端的散射体足够多且相隔足够远,因此将 MIMO 信道的传输矩阵表示为发端相关矩阵、收发两端散射体之间的相关矩阵、收端相关矩阵以及两个元素为独立同分布复高斯随机变量(均值为 0、

方差为 1)矩阵的乘积,即

$$\boldsymbol{H}=\frac{1}{\sqrt{S}}\boldsymbol{R}_{R_x}^{1/2}\boldsymbol{G}_R\boldsymbol{R}_{R-T}^{1/2}\boldsymbol{G}_T\boldsymbol{R}_{T_x}^{1/2}\tag{3}$$

其中, $\boldsymbol{R}_{R_x}$ 是接收天线阵元之间的相关矩阵, $\boldsymbol{R}_{T_x}$ 是发射天线阵元之间的相关矩阵, $\boldsymbol{R}_{R-T}$ 是接收端散射体到发射端散射体之间的相关矩阵, $\boldsymbol{G}_R$ 和 $\boldsymbol{G}_T$ 分别是元素为独立同分布的复高斯随机变量(均值为 0, 方差为 1)构成的矩阵, $1/\sqrt{S}$ 是信道能量归一化的乘积因子。通过此因子的引入, 可以使得信道能量能够独立于散射体的数量。

通过后续的分析将看到, HF MIMO 信道中除了收发两端的天线阵元相关矩阵之外, 还可能存在传播模式之间的相关, 因此可以考虑用 Gesbert MIMO 模型来进行描述和建模。

3 HF MIMO 系统模型的建立

当利用 HF MIMO 进行远距离通信时(也即天波通信时), 具有 n_T 个发射天线、 n_R 个接收天线和 m 种传播模式的 HF MIMO 系统的示意图如图 1 所示。

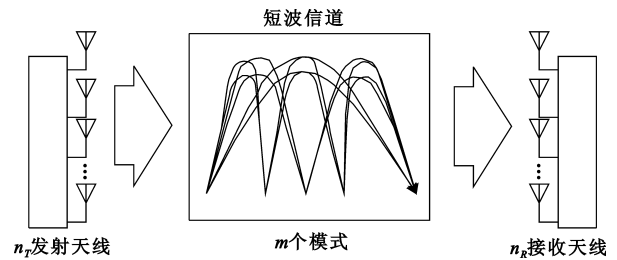


图 1 HF MIMO 系统的原理框图
Fig.1 The principle of HF MIMO system

$$\boldsymbol{H}=\left[\begin{array}{ccc} g_{1,1,1}+g_{1,2,1}+\cdots+g_{1,m,1} & g_{1,1,2}+g_{1,2,2}+\cdots+g_{1,m,2} & \cdots \\ g_{2,1,1}+g_{2,2,1}+\cdots+g_{2,m,1} & g_{2,1,2}+g_{2,2,2}+\cdots+g_{2,m,2} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ g_{n_R,1,n_T}+g_{n_R,2,n_T}+\cdots+g_{n_R,m,n_T} \end{array}\right]\tag{4}$$

其中, $g_{i,j,k}$ 是发射天线 k 和接收天线 i 通过模式 j 之间的复传输函数。

等效地, 上述信道矩阵可被写为 $\boldsymbol{R} \in \mathbb{C}^{n_R \times m}$ 、 $\boldsymbol{M} \in \mathbb{C}^{m \times m}$ 、 $\boldsymbol{T} \in \mathbb{C}^{m \times n_T}$ 3 个矩阵的乘积, 即 $\boldsymbol{H}=\boldsymbol{RMT}$, 其中

$$\boldsymbol{R}=\left[\begin{array}{cccc} g_{r m_{1,1}} & g_{r m_{1,2}} & \cdots & g_{r m_{1,m}} \\ g_{r m_{2,1}} & g_{r m_{2,2}} & \cdots & g_{r m_{2,m}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{r m_{n_R,1}} & g_{r m_{n_R,2}} & \cdots & g_{r m_{n_R,m}} \end{array}\right]\tag{5}$$

假定当发射天线阵元以及接收天线阵元各自都靠得很近, 以致于每个发射-接收天线对可以近似共享相同的传播模式时, 具有 n_T 个发射天线和 n_R 个接收天线的 HF MIMO 系统的原理框图被重画为如图 2 所示。

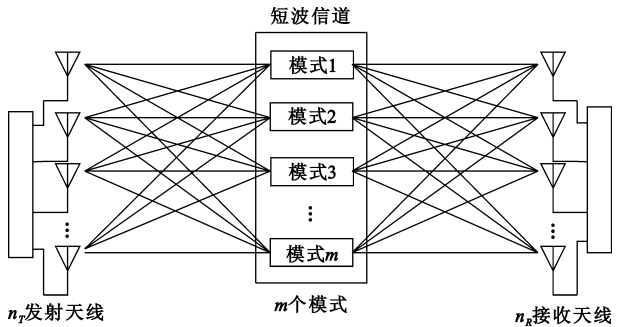


图 2 当发射和接收天线靠得很近时 HF MIMO 系统中的信号路径
Fig.2 The signal paths in HF MIMO system when the transmitting antennas are adjacent to the receiving antennas

图 2 中, 特定传播模式中的收发天线对之间的共同增益可被归结为传播模式增益。收发天线对之间增益的差异可被归结为天线阵元空间位置的不同, 可以通过在接收天线和传播模式之间以及在发射天线与传播模式之间引入传播增益因子来进行说明。文献[19]中实验所给出的邻近接收天线上所接收到的电离图的相似性证明了当收发天线阵元各自都靠得很近时, 每个收发天线对近似共享相同传播模式的假设。

根据图 2, 我们可以将信道矩阵写为

$$\boldsymbol{M}=\left[\begin{array}{cccc} g_{m_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & g_{m_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & g_{m_m} \end{array}\right]\tag{6}$$

$$\boldsymbol{T}=\left[\begin{array}{cccc} g_{m t_{1,1}} & g_{m t_{1,2}} & \cdots & g_{m t_{1,n_T}} \\ g_{m t_{2,1}} & g_{m t_{2,2}} & \cdots & g_{m t_{2,n_T}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m t_{m,1}} & g_{m t_{m,2}} & \cdots & g_{m t_{m,n_T}} \end{array}\right]\tag{7}$$

$$g_{i,j,k} = g_{m_{i,j}} g_m g_{m_{j,k}} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{R}$ 是元素为 $g_{m_{i,j}}$ 的接收天线-传播模式矩阵, $g_{m_{i,j}}$ 表示接收天线 i 和传播模式 j 之间的复传输函数, $\mathbf{M}$ 是元素为 g_{m_i} 的传播模式矩阵, g_{m_i} 表示模式 i 的复传播函数, $\mathbf{T}$ 是元素为 $g_{m_{i,j}}$ 的传播模式-发射天线矩阵, $g_{m_{i,j}}$ 表示模式 i 与发射天线 j 之间的复传输函数。

4 HF MIMO 系统模型的适用性分析

下面来依次考虑短波 MIMO 通信中天线和模式相关的影响。

4.1 接收天线完全相关时的 HF MIMO 系统模型

考虑 n_R 个接收天线完全相关而 m 个传播模式以及 n_T 个发射天线完全无关的情形, 这种情形下所有接收天线和一个特定传输模式之间的传输函数是相同的, 即

$$g_{m_{1,j}} = g_{m_{2,j}} = \cdots = g_{m_{n_R,j}} \quad (9)$$

设 $g_{m_{i,j}} = g_{m_{1,j}}$, 接收天线-传播模式矩阵 $\mathbf{R}$ 变为每一行都相同的秩为 1 的矩阵, 即

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} g_{m_{1,1}} & g_{m_{1,2}} & \cdots & g_{m_{1,m}} \\ g_{m_{1,1}} & g_{m_{1,2}} & \cdots & g_{m_{1,m}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m_{1,1}} & g_{m_{1,2}} & \cdots & g_{m_{1,m}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

设 $g_{i,j,k} = g_{m_{i,j}} g_m g_{m_{j,k}} \equiv g_{m_{1,j}} g_m g_{m_{j,k}} \equiv g_{1,j,k}$, 那么信道矩阵变为每行都相同的秩 1 矩阵, 即

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} g_{1,1,1} + g_{1,2,1} + \cdots + g_{1,m,1} & g_{1,1,2} + g_{1,2,2} + \cdots + g_{1,m,2} & \cdots \\ g_{1,1,1} + g_{1,2,1} + \cdots + g_{1,m,1} & g_{1,1,2} + g_{1,2,2} + \cdots + g_{1,m,2} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (11)$$

4.2 发射天线完全相关时的 HF MIMO 系统模型

考虑 n_T 个发射天线完全相关而 m 个传播模式

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} g_{1,1,1} + g_{1,1,1} + \cdots + g_{1,1,1} & g_{1,1,2} + g_{1,1,2} + \cdots + g_{1,1,2} & \cdots \\ g_{2,1,1} + g_{2,1,1} + \cdots + g_{2,1,1} & g_{2,1,2} + g_{2,1,2} + \cdots + g_{2,1,2} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ g_{n_R,1,n_T} + g_{n_R,1,n_T} + \cdots + g_{n_R,1,n_T} & & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{1,1,1} & g_{1,1,2} \\ g_{2,1,1} & g_{2,1,2} \\ \vdots & \vdots \\ g_{n_R,1,n_T} & g_{n_R,1,n_T} \end{bmatrix} m g_{m1} \begin{bmatrix} g_{m_{1,1}} g_{m_{1,1}} & g_{m_{1,1}} g_{m_{1,2}} & \cdots \\ g_{m_{2,1}} g_{m_{1,1}} & g_{m_{2,1}} g_{m_{1,2}} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ g_{m_{n_R,1}} g_{m_{1,1}} & g_{m_{n_R,1}} g_{m_{1,2}} & \cdots \end{bmatrix} \quad (18)$$

以及 n_R 个接收天线完全无关的情形, 这种情形下所有发射天线和某个特定传输模式之间的传输函数是相同的, 即

$$g_{m_{j,1}} = g_{m_{j,2}} = \cdots = g_{m_{j,n_T}} \quad (12)$$

设 $g_{m_{j,k}} = g_{m_{j,1}}$, 发射天线-传播模式矩阵 $\mathbf{T}$ 变为每一列都相同的秩为 1 的矩阵, 即

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} g_{m_{1,1}} & g_{m_{1,2}} & \cdots & g_{m_{1,n_T}} \\ g_{m_{2,1}} & g_{m_{2,2}} & \cdots & g_{m_{2,n_T}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m_{m,1}} & g_{m_{m,2}} & \cdots & g_{m_{m,n_T}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

设 $g_{i,j,k} = g_{m_{i,j}} g_m g_{m_{j,k}} \equiv g_{m_{i,j}} g_m g_{m_{j,1}} \equiv g_{i,j,1}$, 那么信道矩阵变为每一列都相同的秩 1 矩阵, 即

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} g_{1,1,1} + g_{1,2,1} + \cdots + g_{1,m,1} & g_{1,1,1} + g_{1,2,1} + \cdots + g_{1,m,1} & \cdots \\ g_{2,1,1} + g_{2,2,1} + \cdots + g_{2,m,1} & g_{2,1,1} + g_{2,2,1} + \cdots + g_{2,m,1} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (14)$$

4.3 传播模式完全相关时的 HF MIMO 系统模型

考虑 m 个传播模式完全相关而 n_T 个发射天线以及 n_R 个接收天线完全无关的情形, 这种情形下所有传输模式的传输函数是相同的, 即

$$g_{m1} = g_{m2} = \cdots = g_{m_j} \quad (15)$$

另外, 所有传播模式与某个特定发射天线之间的传输函数是相同的, 即

$$g_{m_{1,k}} = g_{m_{2,k}} = \cdots = g_{m_{m,k}} \quad (16)$$

所有传播模式与某个特定接收天线之间的传输函数也是相同的, 即

$$g_{m_{i,1}} = g_{m_{i,2}} = \cdots = g_{m_{i,n_T}} \quad (17)$$

设 $g_{i,j,k} = g_{m_{i,j}} g_m g_{m_{j,k}} \equiv g_{m_{i,1}} g_{m_1} g_{m_{1,k}} \equiv g_{i,1,k}$, 那么信道矩阵变为

注意, $\boldsymbol{H}_{i \cdot} = \frac{g_{rm_{i,1}}}{g_{rm_{1,1}}} \boldsymbol{H}_{1 \cdot}$, 其中 $\boldsymbol{H}_{i \cdot}$ 表示 $\boldsymbol{H}$ 的第 i 行。可见 $\boldsymbol{H}$ 具有单一线性独立的行, 且秩为 1, 即使信道矩阵实际上不相关。这样的信道称为锁孔信道^[20]。

4.4 天线非紧密间隔时的 HF MIMO 系统模型

前述的 HF MIMO 系统模型对于发射天线阵列以及接收天线阵列的阵元紧密间隔、每个发射-接收天线对近似共享相同的传播模式时的通用情况是有效的。对于这样一种情形, 信道矩阵可以被方便地分解成 3 个矩阵的乘积形式, 信道矩阵秩的最大值依赖于传播模式的数目 m 以及各个模式之间的相关值。当发射和接收天线阵列的阵元不是紧密间隔时, 信道矩阵的结构将变得更为复杂, 信道矩阵的秩也将会更高, 可望带来更高的容量。下面考虑两种不同的情况。

(1)发射天线阵元间隔很开而接收天线阵元紧密间隔时的 HF MIMO 信道矩阵模型

考虑发射天线阵元间隔很开而接收天线阵元紧密间隔时的情形。例如, 发射天线阵列可被放置于广阔的陆地以便发射阵元之间有足够远的间隔, 而接收天线被放置于舰艇上使得接收阵元不得被很近地放置在一起。这种情况下, 来自每个发射天线的信号将经历完全不同的传播模式, 并且每个发射天线可用的传播模式也很可能是不同的。图 3 给出了这种情况时的信号路径。

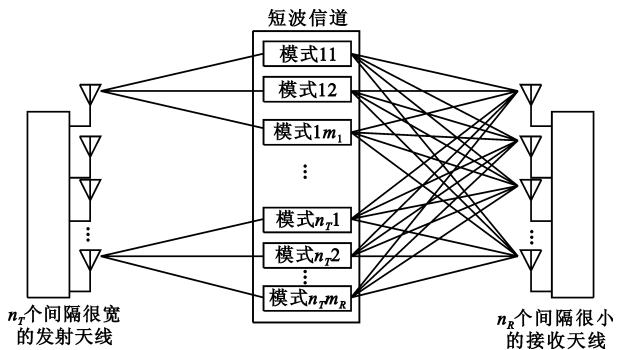


图 3 发射天线阵元间隔很开而接收天线阵元紧密间隔时的 HF MIMO 的信号路径

Fig.3 The signal paths in HF MIMO system when the transmitting antennas are spaced but the receiving antennas are adjacent

对于图 3 而言, 信道矩阵可以重写为

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} g_{1,11,1} + g_{1,12,1} + \cdots + g_{1,1m_1,1} & \cdots \\ g_{2,11,1} + g_{2,12,1} + \cdots + g_{2,1m_1,1} & \cdots \\ \vdots & \ddots \\ g_{n_T, n_T1, n_T} + g_{n_T, n_T2, n_T} + \cdots + g_{n_T, n_Tm_{n_T}, n_T} & \cdots \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中, $g_{i, kj, k}$ 是发射天线 j 和接收天线 i 之间通过模式 kj 时的复传输函数, 模式 kj 是发射天线 k 的模式集合中的第 j 个模式, m_k 是发射天线 k 的模式数目。等效地, 信道矩阵可被写为以下形式:

$$\boldsymbol{H} = [\boldsymbol{T}_1 \quad \boldsymbol{T}_2 \quad \cdots \quad \boldsymbol{T}_{n_T}] \quad (20)$$

$$\boldsymbol{T}_k = \begin{bmatrix} g_{rm_{1,k1}} & g_{rm_{1,k2}} & \cdots & g_{rm_{1,lm_k}} \\ g_{rm_{2,k1}} & g_{rm_{2,k2}} & \cdots & g_{rm_{2,lm_k}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{rm_{n_R,k1}} & g_{rm_{n_R,k2}} & \cdots & g_{rm_{n_R,lm_k}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{m_{k1}} g_{m_{k1,k}} \\ g_{m_{k2}} g_{m_{k2,k}} \\ \vdots \\ g_{m_{lm_k}} g_{m_{lm_k,k}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$g_{i, kj, k} = g_{rm_{i, kj}} g_{m_{kj}} g_{m_{kj, k}} \quad (22)$$

(2)发射天线阵元和接收天线阵元间隔都很开时的 HF MIMO 系统模型

如果发射天线阵元和接收天线阵元都间隔很开, 发射-接收天线对之间的增益将不相关, 信道矩阵的秩将既不再受限于传播模式的数量 m , 也不受限于传播模式之间的相关性。对这种情况, 瑞利信道模型将是合适的模型。

4.5 不同情形时 HF MIMO 信道模型的特点比较

通过对上述 4 种情形的分析, 可总结得出当发射天线及接收天线间隔紧密时, 不同天线及模式相关条件下的 HF MIMO 信道矩阵的秩特性具有如下特点:

(1)无论是发射天线全相关、接收天线全相关还是传播模式全相关的存在, 都将得到秩为 1 的 HF MIMO 信道矩阵;

(2)如果发射天线、接收天线以及传播模式都不相关, 那么 HF MIMO 信道矩阵将是满秩的, 其秩由接收天线数目 n_R 、发射天线数目 n_T 和传播模式数目 m 中的最小者决定;

(3)HF MIMO 信道矩阵秩的最大值取决于传播模式数目 m 以及传播模式之间的相关性, 这是因为我们可以控制发射及接收天线阵列(包含天线数目以及相关性)的设计;

(4)假定存在 m 个不相关的传播模式, 那么我们需要用 m 个不相关的发射天线以及 m 个不相关的接收天线才能获得具有最大秩 m 的 HF MIMO 信道矩阵; 如果某些发射天线或者接收天线阵元之间存在相关, 那么需要 $n_R, n_T > m$ 才能实现具有最大秩的信道矩阵;

(5)当发射天线阵元以及接收天线阵元之间的

间隔增加时, HF MIMO 信道矩阵的结构将变得更加复杂, 信道矩阵的秩也将相应增加; 当收发两端的天线阵元间隔都足够大时, 信道矩阵将既不受限于传播模式数目 m , 也不受限于传播模式相关, 此时可用瑞利模型来进行建模。

5 结束语

本文基于现有的 Gesbert MIMO 模型, 并结合短波通信传播的特点, 建立了一个 HF MIMO 系统模型, 并对该模型的适用性进行了分析。分析得知, 该模型所表示的 HF MIMO 信道矩阵的秩不仅是接收天线数目 n_R 、发射天线数目 n_T 和传播模式数目 m 的函数, 而且也是接收天线阵元相关系数、发射天线阵元相关系数以及传播模式相关系数的函数。当收、发天线阵列特性和传播模式相关矩阵变化时, 该 HF MIMO 系统模型与实际 HF MIMO 系统的信道矩阵具有相同的秩特性。对该模型进行进一步分析可知, 它可以通过接收天线相关矩阵、发射天线相关矩阵以及传播模式相关矩阵产生。

对于获取 HF MIMO 系统的最佳工作频率所需进行的容量计算来说, 本文所构建的模型只需测量天线相关矩阵和模式相关矩阵, 进而可用这些相关矩阵来产生信道矩阵, 因而是比直接测量信道矩阵更好的一个可选方案。其突出优点是测量记录相关数据以计算相关矩阵的硬件系统相对于直接测量记录信道矩阵的硬件系统要简单得多。这是因为测量模式相关矩阵仅需要一个发射天线和一个接收天线, 而测量天线相关也仅需要单个发射天线和较小数量的接收天线单元。但是若要直接测量 HF MIMO 信道矩阵, 则需要较大数量的发射和接收天线阵元, 且所采用的天线阵元的数目对被测量的信道矩阵的秩设置了一个上限, 因此也对容量设置了上限。

文中仅给出了几种特殊情形时的 HF MIMO 系统模型以及相应的适用性分析, 对于更一般的情况还需通过计算机仿真来进一步分析。另外, 由于篇幅的限制, 有关通过测量所得的相关矩阵产生 HF MIMO 信道矩阵的方法也将在下一步进行讨论。需要强调的是, 文中所建立的 HF MIMO 系统模型的主要优点在于它可以较好地模拟实际 HF MIMO 系统的传输状况, 并且可被用来进行容量计算, 从而获得最大容量所对应的频率作为 HF MIMO 系统的工作频率, 这也是 HF MIMO 系统区别于传统 SISO HF 系统所必须解决的问题之一。

参考文献:

- [1] Foschini G J. Layered Space-Time Architecture For Wireless Communication in a Fading Environment When Using Multi-Element Antennas[J]. Bell Labs Technical Journal, 1996, 1(2): 41 - 59.
- [2] Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels[J]. European Transactions on Telecommunications, 1999, 10(6): 585 - 595.
- [3] 关建新, 高俊, 叶晓慧. 短波 MIMO 通信的研究进展[J]. 电讯技术, 2011, 51(9): 136 - 142.
GUAN Jian-xin, GAO Jun, YE Xiao-hui. Survey on the MIMO techniques within HF band[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(9): 136 - 142. (in Chinese)
- [4] Salous S, Feeney S M, Warrington E M, et al. Experimental investigations of MIMO in the HF band[C]//Proceedings of 12th IET International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques. York: IEEE, 2012: 1 - 4.
- [5] Ndao P M, Erhel Y M, Lemur D, et al. First experiments of a HF MIMO system with polarization diversity[C]//Proceedings of 12th IET International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques. York: IEEE, 2012: 1 - 5.
- [6] Sahay S B, Bhagwat K C, Mohan P R J. Exploitation of MIMO techniques for reliable HF communication[C]//Proceedings of 2012 International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM). Bangalore: IEEE, 2012: 1 - 4.
- [7] Almers P, Bonek E, Burr A, et al. Survey of Channel and Radio Propagation Models for Wireless MIMO Systems[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2007(1): 56.
- [8] Burr A. Capacity Bounds and Estimates for the Finite Scatterers MIMO Wireless Channel[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2003, 21(5): 812 - 818.
- [9] Debbah M, Muller R. MIMO channel modeling and the principle of maximum entropy[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(5): 1667 - 1690.
- [10] Sayeed A. Deconstructing Multi-antenna Fading Channels[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(10): 2563 - 2579.
- [11] Chuah C N, Kahn J, Tse D. Capacity of Multi-Antenna Array Systems in Indoor Wireless Environment[C]//Proceedings of 1998 IEEE Global Telecommunications Conference. Sidney, Australia: IEEE, 1998: 1894 - 1899.
- [12] Chizhik D, Rashid-Farrokhi F, Lozano A, et al. Effect of Antenna Separation on the Capacity of BLAST in Correlated Channels[J]. IEEE Communications Letters, 2000, 4(11): 337 - 339.
- [13] Shiu D S, Foschin G J, Gans M, et al. Fading correlation and its effect on the capacity of multi-element antenna systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(3): 502 - 513.

- [14] Kermaol J, Schumacher L, Pedersen K, et al. A Stochastic MIMO Radio Channel Model with Experimental Validation [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(6): 1211 – 1226.
- [15] Weichselberger W, Herdin M, Ozelik H, et al. A stochastic MIMO channel model with joint correlation of both link ends[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006(5): 90 – 100.
- [16] Gesbert D, Bolcskei H, Core D, et al. Outdoor MIMO wireless channels: Models and performance prediction[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50 (12): 1926 – 1934.
- [17] Schumacher L, Kermaol J P, Frederiksen F, et al. MIMO Channel Characterization[EB/OL]. 2001 – 02(2013 – 03 – 18). <http://www.ist-metra.org/deliverables>.
- [18] McNamara D, Beach M, Fletcher P, et al. Initial Investigation of Multiple-Input Multiple-Output Channels in Indoor Environments [C] //Proceedings of 2000 IEEE Benelux Chapter Symposium on Communications and Vehicular Technology. Leuven, Belgium: IEEE, 2000: 139 – 143.
- [19] Brine N L. Capacity of MIMO Wireless Communication Systems Operating in the HF Band[D]. Adelaide, Australia: University of Adelaide, 2010.
- [20] Chizhik D, Foschini G, Gans M, et al. Keyholes, correlations and capacities of multi-element transmit and receive antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(2): 361 – 368.

作者简介:



关建新(1978—),男,湖北随州人,2001、2004 和 2011 年于海军工程大学分别获学士学位、硕士学位和博士学位,现为讲师,主要研究方向为多输入多输出、软件无线电、短波通信;

GUAN Jian-xin was born in Suizhou, Hubei Province, in 1978. He received the B.S. degree, M.S. degree and the Ph.D. degree from Naval University of Engineering in 2001, 2004 and 2011, respectively. He is now a lecturer. His research interests include multiple input multiple output (MIMO) techniques, software defined radio (SDR) and shortwave communications.

Email: jx_guan@sina.com

张 静(1981—),男,江苏泰兴人,2001 年和 2006 年分别于海军工程大学获工学学士和硕士学位,现为讲师,主要研究方向为对潜通信、天线与电波传播;

ZHANG Jing was born in Taixing, Jiangsu Province, in 1981. He received the B.S. degree and the M.S. degree from Naval University of Engineering in 2001 and 2006, respectively. He is now a lecturer. His research interests include submarine communications, antenna and radio propagation.

窦高奇(1981—),男,山西长治人,2004 年于海军工程大学获学士学位,2009 年于海军工程大学获通信与信息系统专业博士学位,现为讲师,主要研究方向为信道编码、估计与均衡。

DOU Gao-qi was born in Changzhi, Shanxi Province, in 1981. He received the B.S. degree and the Ph. D. degree from Naval University of Engineering in 2004 and 2009, respectively. He is now a lecturer. His research interests include channel coding, estimation and equalization.