

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.05.009

分布式双极化卫星移动 MIMO 信道模型

郭 庆¹, 张 硕¹, 杨明川^{1,2}, 李 明¹, 唐文彦²

(1. 哈尔滨工业大学 通信技术研究所, 150080 哈尔滨; 2. 哈尔滨工业大学 精密仪器研究所, 150080 哈尔滨)

摘 要: 为更好研究分布式双极化卫星移动 MIMO 通信系统, 在对其信道特性进行分析的基础上, 建立了信道模型, 计算该信道模型的二阶统计量并估算系统信道容量. 模型保证子信道之间的相关性与信道的统计特性不变, 并考虑多普勒频谱扩展对小尺度衰落的影响. 仿真结果表明, 将 MIMO 技术应用于卫星通信中能够提高系统信道容量, 信道容量与系统天线数正相关.

关键词: 分布式系统; 双极化; 卫星移动通信; MIMO; 信道建模

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)05-0050-07

Modeling of distributed dual-polarized MIMO land mobile satellite channels

GUO Qing¹, ZHANG Shuo¹, YANG Mingchuan^{1,2}, LI Ming¹, TANG Wenyan²

(1. Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China;

2. Institute of Precision Instrument, Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China)

Abstract: For the study of distributed dual-polarized MIMO land mobile satellite (MIMO-LMS) system, a statistical model for the channels is proposed after the analysis of the channel characteristics. The second order statistics are calculated and channel capacity of different type of MIMO-LMS system is estimated. Considering the Doppler spread in the small scale fading and selecting the proper form of MIMO model, the channel model can keep the statistic characteristics as well as the correlation of the sub-channels unchanged. The simulation result shows that the channel capacity can be increased by applying MIMO to LMS communication and enhances with the increasing number of the antennas.

Keywords: distributed system; dual-polarized; land mobile satellite; MIMO; channel modeling

卫星移动通信是全球通信网络中的重要组成部分.随着通信技术的发展,卫星移动通信将由语音数据业务需求向多媒体业务需求拓展^[1],这需要通信系统具有更高质量、更高速率的传输能力和更大的系统容量多输入多输出 MIMO (multi-input multi-output) 技术在发送端和接收端配置多副天线,充分利用空间资源,在保证链路的可靠性的同时提高系统容量,现已成为 3G、4G 等移动通信系统的关键技术.2005 年,卫星 MIMO 系统开始得到广泛关注,人们对其信道^[2-4]、系统设计^[5]和编码技术^[6]等方面进行了研究.卫星通信系统的

设计和优化受到信道的制约,因此信道模型的建立尤为重要.文献[7]对低仰角的双极化卫星 MIMO 信道在 3 种不同环境下的特性进行了模拟测量,建立了信道模型.

目前将 MIMO 技术运用到卫星通信系统主要有两种策略^[8].一种是利用空间分集构成分布式卫星 MIMO 系统;另一种是利用极化分集构成极化卫星 MIMO 系统.文献[9]同时考虑空间分集和极化分集,提出了分布式双极化卫星移动 MIMO 系统(4×4 卫星移动 MIMO 系统),并给出其信道模型建立方法.但是该模型未对小尺度衰落信道的统计特性进行分析,也没有考虑多普勒频移的影响.在文献[9]的基础上,以小尺度衰落模型为研究重点,引入多普勒频谱扩展对小尺度衰落的影响,并保证子信道之间的相关性的同时保持信道的统计特性不变.同时,对所建立的信道模型进

收稿日期: 2013-05-31.

基金项目: 国家自然科学基金(61101126); 国家博士后基金(2011M500664).

作者简介: 郭 庆(1964—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 杨明川, mcyang@hit.edu.cn.

行了理论分析,计算了各个子信道的二阶统计量,估算了信道容量.

1 分布式双极化卫星移动 MIMO 信道建模

分布式双极化卫星移动 MIMO 系统由两颗 GEO(geostationary earth orbit) 卫星和一个地面移动终端构成,见图 1.每颗卫星均配有一副双极化天线,地面移动终端配有两副双极化天线,利用极化分集和空间分集构成分布式双极化卫星移动 MIMO 系统.该系统利用 S 波段进行通信,系统带宽为 5 MHz.

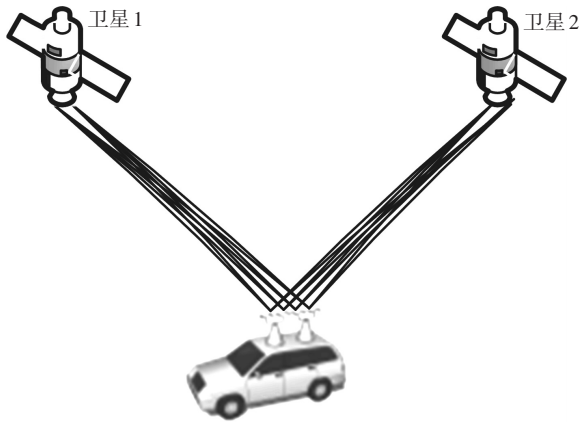


图1 分布式双极化卫星移动 MIMO 系统
该系统为

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}\mathbf{x}(t) + \mathbf{n}(t). \quad (1)$$

式中: t 为时间;在时刻 t , $\mathbf{x}(t)$ 、 $\mathbf{y}(t)$ 和 $\mathbf{n}(t)$ 均为 4 维列向量,分别为发送信号、接收信号和信道噪声; $\mathbf{H}$ 为信道矩阵,即

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11,11} & h_{11,12} & h_{12,11} & h_{12,12} \\ h_{11,21} & h_{11,22} & h_{12,21} & h_{12,22} \\ h_{21,11} & h_{21,12} & h_{22,11} & h_{22,12} \\ h_{21,21} & h_{21,22} & h_{22,21} & h_{22,22} \end{bmatrix} =$$

$$\mathbf{P}_u = [p_{ij}] = \begin{bmatrix} (1-g_1)(1-g_2) & (1-g_1)g_2 \\ (1-g_1)b_2 & (1-g_1)(1-b_2) \\ b_1(1-g_2) & b_1g_2 \\ b_1b_2 & b_1(1-b_2) \end{bmatrix}$$

式中: g_k ($k=1,2$) 为第 k 条链路从“坏状态”变为“好状态”的概率, b_k 为第 k 条链路从“好状态”变为“坏状态”的概率.由于卫星信道具有相关性,需要引入相关性对状态转移矩阵的影响.文献[10]给出具有相关性的卫星信道状态转移矩阵的表示方法.

1.1.2 卫星移动通信信道特性

信道衰落包含大尺度衰落和小尺度衰落两部

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式中 $h_{kl,ij}$ ($k, l, i, j = 1, 2$) 为移动终端的第 k 副天线的第 i 种极化天线与第 l 个卫星的第 j 种极化天线之间的信道系数.

1.1 分布式双极化卫星移动 MIMO 信道特性

1.1.1 马尔可夫状态转移模型

卫星移动通信中信道状态会随环境的变化而变化,通常采用马尔可夫状态转移模型来描述卫星链路的状态.分布式双极化卫星移动 MIMO 系统包含两颗卫星,具有两组卫星链路.假设每组链路有两个状态:“好状态”和“坏状态”,则需要利用四状态马尔可夫状态转移模型来描述该系统的信道状态,见图 2.

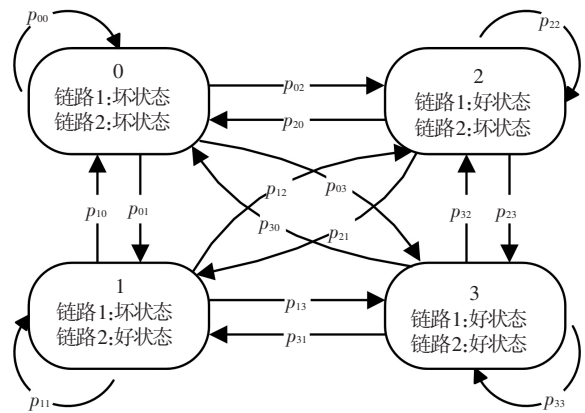


图2 四状态马尔可夫状态转移模型

设 $\mathbf{P}_u$ 为状态转移概率 p_{ij} ($i, j = 0, 1, 2, 3$) 构成的状态转移矩阵, p_{ij} 为在某时刻处在 i 状态而下一时刻变为 j 状态的概率.当两组卫星链路没有相关性时,状态转移矩阵为^[10]

$$\mathbf{P}_u = [p_{ij}] = \begin{bmatrix} g_1(1-g_2) & g_1g_2 \\ g_1b_2 & g_1(1-b_2) \\ (1-b_1)(1-g_2) & (1-b_1)g_2 \\ (1-b_1)b_2 & (1-b_1)(1-b_2) \end{bmatrix}, \quad i, j = 0, 1, 2, 3. \quad (3)$$

分.设分布式双极化卫星移动 MIMO 信道矩阵为

$$\mathbf{H} = [\mathbf{h}] = [\bar{\mathbf{h}}_{ij}] + [\tilde{\mathbf{h}}_{ij}] = \bar{\mathbf{H}} + \tilde{\mathbf{H}}, \quad i, j = 1, 2, 3, 4. \quad (4)$$

式中: $\bar{\mathbf{H}}$ 和 $\tilde{\mathbf{H}}$ 分别为大、小尺度衰落信道矩阵; $\bar{h}_{ij}$ 和 $\tilde{h}_{ij}$ 分别为大、小尺度衰落的子信道系数.

1) 大尺度衰落是一种慢衰落,包含固定的自由空间损耗和时变的阴影衰落.

由于终端移动,信道在时间上具有一定的相关性,相关系数 ρ_s 为

$$\rho_s(\tau) = \exp(-v|\tau|/r_c). \quad (5)$$

式中: v 为地面移动终端的移动速度, r_c 为相干距离。

对于时间间隔为 T 的采样,利用低通滤波器可使信道具有时间相关性^[11]:

$$y_n = x_n + \rho_s(T) \cdot y_{n-1}. \quad (6)$$

通过低通滤波器后序列的方差会发生变化,需要对其幅度进行处理。

2) 小尺度衰落是一种快衰落,主要包含多径衰落,对于移动通信还包含多普勒频移引起的多普勒频谱扩展。多普勒频谱扩展是很重要的信道特性,可利用巴特沃兹滤波器来实现^[12]。

1.1.3 极化对信道的影响

分布式双极化卫星移动 MIMO 系统利用了极化分集。对于 S 波段,一般采用圆极化(左旋/右旋极化)的方式。极化会影响信号的功率,也会使子信道之间具有相关性。

1) 极化对信号功率的影响。描述极化的参数主要有极化鉴别度 XPD_{ant} 和极化耦合度 XPC_{env} 。极化鉴别度是极化天线的一个性能参数,设 β_{ant} 为发送功率相同的情况下接收到的不同极化与相同极化信号的功率比,则 $XPD_{ant} = 10\lg(1/\beta_{ant})$ 。极化耦合度主要指环境对极化的影响,设 γ_{env} 为收发天线不同极化与收发天线相同极化信号的功率比,则 $XPC_{env} = 10\lg(1/\gamma_{env})$ 。

卫星端天线的极化鉴别度一般很大^[3],可认为卫星发射天线的极化是理想的,只考虑地面接收端极化天线对信号功率的影响。大尺度衰落没有明显的多径效应,只需考虑极化鉴别度。小尺度衰落则需要同时考虑极化鉴别度和极化耦合度。

2) 极化对相关性的影响。由于地面终端接收天线不理想,接收天线不仅能接收相同极化的信号,还能接收不同极化的信号,这使链路具有一定的相关性。建立信道模型时,考虑空间相关性的同时还要考虑极化所产生的相关性。

1.2 分布式双极化卫星移动 MIMO 信道模型

分布式双极化卫星移动 MIMO 信道由 16 条卫星子信道构成。Loo 模型^[13]是一种经典的卫星信道模型,能够很好地描述卫星信道,因此每条子信道采用 Loo 模型。

Loo 模型包含大尺度衰落和小尺度衰落两部分,参数分别为 M 、 Σ 和 M_p 。大尺度衰落的幅度服从对数正态分布, M 和 Σ 分别为对数正态分布所对应的正态分布的均值和标准差,其相位服从

$[0, 2\pi]$ 上的均匀分布。小尺度衰落包络服从瑞利分布, M_p 为其包络的平均功率值。文献[15]给出在不同环境下 M 、 Σ 和 M_p 的参数。

图 3 为模型的建立过程。首先利用四状态马尔可夫状态转移模型确定信道参数。然后建立每条卫星子信道的信道模型,并利用 MIMO 模型产生信道的相关性。最后对大尺度衰落进行速率调整完成建模。

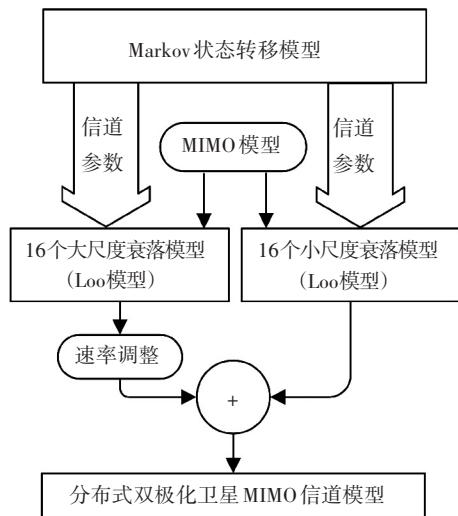


图 3 分布式双极化卫星移动 MIMO 信道模型建立过程

1.2.1 大尺度衰落模型

为使子信道之间具有相关性,利用了窄带 MIMO 信道模型^[12]:

$$\text{vec}(\mathbf{H}_{\text{corr}}) = \mathbf{R}_L^{1/2} \text{vec}(\mathbf{G}). \quad (7)$$

式中: $\text{vec}(\cdot)$ 将矩阵转换为列向量; $\mathbf{H}_{\text{corr}}$ 为具有信道相关性的信道矩阵; $\mathbf{G}$ 为 4 阶方阵,其中的每个元素都是标准正态分布随机变量经过式(6)滤波器后的结果,由于式(6)为线性滤波器, $\mathbf{G}$ 中的每个元素仍为正态分布; $\mathbf{R}_L$ 为信道相关系数矩阵,为 16 阶方阵。

分布式双极化卫星移动 MIMO 系统由两个双极化卫星移动 MIMO 系统构成。相关性包含极化相关性和空间相关性。对于极化相关性,目前已经有对双极化卫星移动 MIMO 系统信道的模拟测量^[3],给出两条不同极化信道之间的信道相关系数矩阵,进而可得到分布式双极化卫星移动 MIMO 系统的各个极化天线之间的相关系数矩阵。但是此相关系数矩阵描述的是对数正态分布序列之间的相关性,故需要将其转换成所对应的正态分布序列的相关系数矩阵,本文近似认为两者相等。对于空间相关性,分布式双极化卫星移动 MIMO 系统两颗卫星之间的相关系数为 ρ_{sat} ,同样近似认为正态分布的相关系数与对数正态分布的相关系数相等。利用各个极化天线之间的相关系数矩阵和 ρ_{sat} 可得到分布式

双极化卫星移动 MIMO 信道大尺度衰落信道的相关系数矩阵 $\mathbf{R}_L$ [9].

大尺度衰落服从对数正态分布, 利用下式可得到满足对数正态分布的信道系数:

$$\text{vec}(\mathbf{H}_L) = 10^{[\text{vec}(\mathbf{H}_{\text{corr}}) \cdot (\Sigma/20) + (M/20)]}. \tag{8}$$

根据极化对信号功率的影响, $\mathbf{H}_L(\mathbf{H}_L = [h_{lij}])$, $i, j = 1, 2, 3, 4$ 经过功率调整可得到大尺度衰落矩阵 $\bar{\mathbf{H}}$ 的幅度值. 信道序列相位 Φ 服从 $[0, 2\pi]$ 上的均匀分布. 随着终端的移动, 不同位置的相位不同, 设其相位增量为

$$\Phi_0 = \frac{2\pi}{f \cdot F \cdot \cos(\text{AOA})}. \tag{9}$$

式中: f 为载波频率; F 为抽样时波分数, 即对每一个波长的抽样次数, 文中为 8; AOA 为卫星信号的波达角. 得到大尺度衰落信道系数:

$$\bar{\mathbf{H}} = [\bar{h}_{ij}] = [\bar{h}_{lij} \cdot \exp(j\Phi + jn\Phi_0)], \tag{10}$$

$i, j = 1, 2, 3, 4.$

1.2.2 小尺度衰落模型

考虑多普勒频谱扩展对小尺度衰落的影响, 每个信道均利用巴特沃兹滤波器得到具有多普勒频谱扩展特性的序列, 然后得到信道矩阵 $\mathbf{H}$.

与大尺度衰落信道相同, 利用式 (7) 所示的窄带 MIMO 信道模型产生链路的相关性:

$$\text{vec}(\mathbf{H}_K) = \mathbf{R}_S^{1/2} \text{vec}(\mathbf{H}). \tag{11}$$

式中: $\mathbf{R}_S$ 为小尺度衰落信道相关系数矩阵, $\mathbf{H}_K$ 为产生了相关性的信道矩阵.

卫星与地面接收端的距离很大, 并且链路有很强的 LOS(line of sight) 特性. 对于小尺度衰落, 可假设发送端与接收端无关, 故可利用接收端和发送端的相关系数矩阵对整个链路的相关系数矩阵进行近似, 即 Kronecker 模型所给出的 [12]:

$$\mathbf{R}_S = \mathbf{R}_T \otimes \mathbf{R}_R. \tag{12}$$

对于相关系数矩阵, 同样考虑空间相关性和极化相关性. 发送端不同卫星相同极化和相同卫星不同极化的相关系数分别为 ρ_{st}, ρ_{pt} , 接收端不同副天线相同极化和同一副天线不同极化的相关系数分别为 ρ_{sr}, ρ_{pr} . 利用这几个相关系数可得到发送端的相关系数矩阵 $\mathbf{R}_T$ 与接收端的相关系数矩阵 $\mathbf{R}_R$. 最后经过功率调整可得到小尺度衰落的信道矩阵 $\tilde{\mathbf{H}}$.

2 信道模型的理论分析

卫星移动 MIMO 信道模型准确性的验证方法主要是与实测数据进行对比. 目前, 并没有分布式双极化卫星移动 MIMO 信道的测量数据. 但是可通过卫星移动 MIMO 信道具有的特性来对模型的

准确性进行分析. 分布式卫星移动 MIMO 信道主要有两个特性:

- 1) 生成的信道序列之间具有相关性.
- 2) 每条子信道都是一条卫星信道, 具有卫星信道的特性, 模型产生的信道序列的统计特性应与初始参数相同.

2.1 大尺度衰落信道分析

在建立信道相关性时, 采用式 (7) 的窄带 MIMO 模型, 该模型为线性模型. 在大尺度衰落信道模型的建立过程中, 首先将正态分布序列通过式 (7) 产生信道相关性, 然后转换为对数正态分布. 正态分布为线性分布, 故满足该模型要求, 能够产生链路的相关性. 在建立完信道相关性后引入统计特性参数, 因此能够保证统计特性不变.

2.2 小尺度衰落信道分析

对于小尺度衰落, 首先利用 Kronecker 模型对信道相关系数矩阵进行近似, 然后同样运用 MIMO 线性模型. 小尺度衰落每个子信道都服从复正态分布, 满足线性模型的要求, 能够产生链路的相关性. 利用 Kronecker 模型时, MIMO 信道模型有两种主要形式:

$$\mathbf{H}_K = \mathbf{R}_R^{1/2} \mathbf{H}(\mathbf{R}_T^{1/2})^T, \tag{13}$$

$$\text{vec}(\mathbf{H}_K) = \mathbf{R}_S^{1/2} \text{vec}(\mathbf{H}). \tag{14}$$

式 (13) [9] 使用之前要对接收端和发送端的相关系数矩阵进行归一化处理, 即满足

$$\text{tr}\{\mathbf{H}_K\} = \text{tr}\{\mathbf{R}_T\} \cdot \text{tr}\{\mathbf{R}_R\}. \tag{15}$$

式中 $\text{tr}(\cdot)$ 为矩阵的迹. 运用此种模型时需要功率进行归一化处理. 由于极化对链路信号功率产生了一定的影响, 每条子链路的信号功率并不相同, 式 (13) 的实现较为复杂, 因此本文选用式 (14).

表 1、2 分别给出在空旷地环境下“好状态”和“坏状态”小尺度衰落的统计特性. 其中“仿真参数”指仿真设定的信道统计特性值, “统计结果”指对仿真结果进行统计而得到的信道统计特性值. 分布式双极化卫星移动 MIMO 的子信道主要分为两种, 即收发天线极化相同的信道和收发天线极化不同的信道, 给出 h_{11} (极化相同) 和 h_{12} (极化不同) 的小尺度功率值的对比.

表 1 “好状态”小尺度衰落信道统计特性

参数		M_p /dB	M_p 相对误差/dB	均值
极化相同	仿真参数	-27.862		0
信道 h_{11}	统计结果	-27.597	-0.266	$<10^{-3}$
极化不同	仿真参数	-39.568		0
信道 h_{12}	统计结果	-39.101	-0.467	$<10^{-4}$

表 2 “坏状态”小尺度衰落信道统计特性

参数		M_p /dB	M_p 相对误差/dB	均值
极化相同	仿真参数	-27.985		0
	信道 h_{11} 统计结果	-28.051	0.066	$<10^{-4}$
极化不同	仿真参数	-39.974		0
	信道 h_{12} 统计结果	-39.509	0.466	$<10^{-4}$

由表 1、2 可知,本文所建立的模型并没有改变小尺度衰落本身的统计特性,相对误差很小.对于 M_p 值,相对误差在 1 dB 以下,并且每路信号的均值也基本没有发生变化,都在 0 值附近.产生微小误差的原因是所统计的信道序列数量有限.因此,选用式 (14) 能够保持小尺度衰落的统计特性不变.

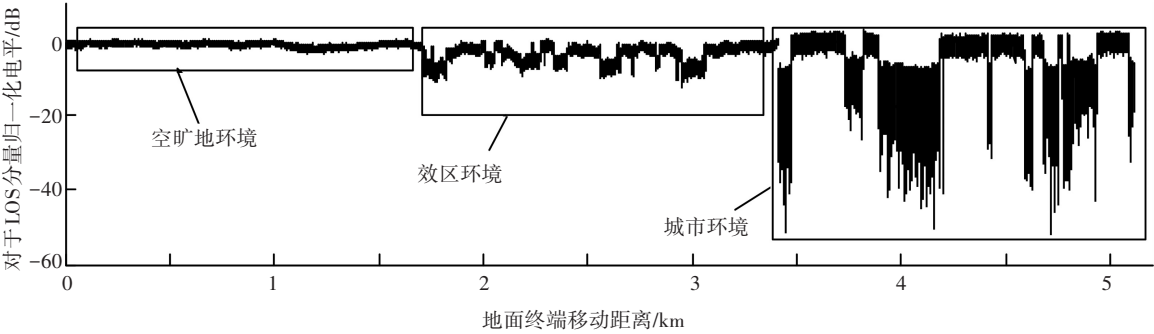
表 3 仿真参数

参数	AOA/(°)	$v/(km \cdot h^{-1})$	XPD_{ant}/dB	XPC_{env}/dB	ρ_{sat}	g_k	b_k	ρ_{sr}	ρ_{pr}	ρ_{st}	ρ_{pt}
城市环境	40	50	10	5	0.7	0.085	0.081	0	0.5	0.3	0.5
郊区环境	40	50	10	6	0.3	0.093	0.124	0	0.5	0.2	0.5
空旷地环境	40	50	15	15	0.3	0.071	0.022	0	0.5	0.2	0.4
参考文献	[3]	[3]	[3]	[3]	[14]	[15]	[15]	[14]	[14]	[14]	[14]

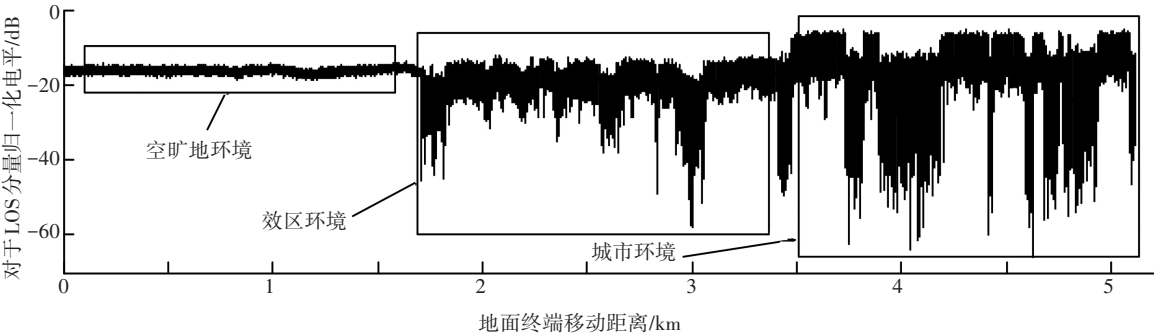
3 信道仿真及容量估算

已有的仿真参数见表 3,可得到不同环境下各个子信道系数的时间序列.

给出 3 种环境下的 h_{11} 和 h_{12} 两条子信道的信道序列的电平值,该电平值是对 LOS 分量进行归一化处理后的结果,见图 4.可看出,发射天线与接收天线极化相同的信道的衰减幅度小,发射接收天线极化不同时衰减较大,并且 3 个环境下,每条子信道在两种状态(“好状态”和“坏状态”)之间变化.环境对信道状态有很大影响,空旷地环境由于存在 LOS 链路,因此信道相对稳定,而城市环境由于建筑物多,信道在两个状态之间剧烈变化,郊区环境处于两者之间.此外,通过两图的对比可以看出,极化会影响信号的接收功率.



(a) h_{11} 子信道



(b) h_{12} 子信道

图 4 分布式双极化卫星移动 MIMO 信道时间序列

3.1 二阶统计特性

描述卫星信道统计特性的二阶统计量主要有电平通过率和平均衰落持续时间.二阶统计特性

与移动终端的速度有关,能够描述移动通信信道的特性,并且通过二阶统计量可以选择最适宜的误差检测编码方式和交织算法.

图 5、6 分别为 3 种环境下 h_{11} 和 h_{12} 两条子信道随信号电平变化的电平通过率和平均衰落持续时间, 其中对信号电平进行了均方根归一化处理. 通过二阶统计量可看出信道可明显区分出两个状态.

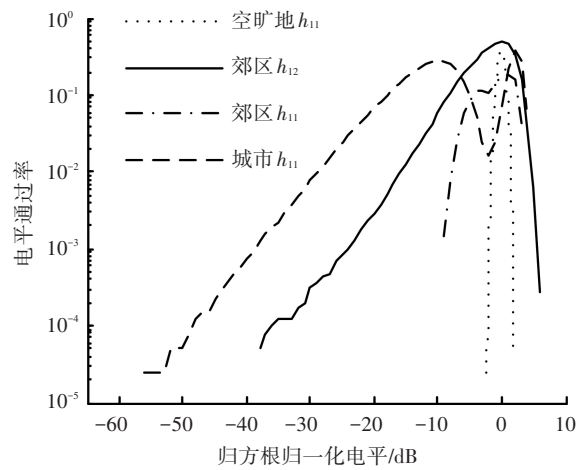


图 5 电平通过率

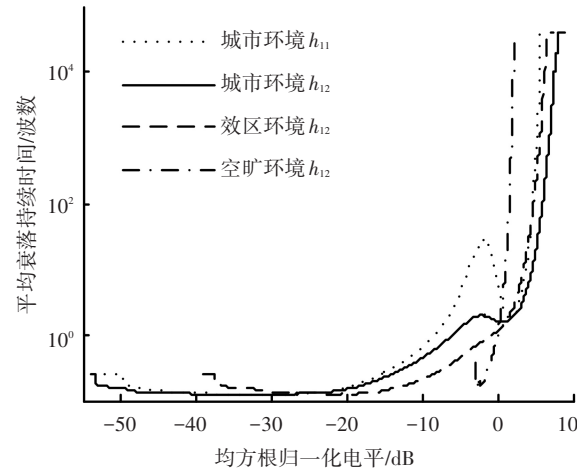


图 6 平均衰落持续时间

3.2 信道容量估算

通常所说的香农容量是在确定性信道条件下得到的信道容量, 是一个确定值. 慢衰落信道中主要利用中断容量这一概念. 当信道瞬时容量 C_{inst} 值小于某个指定容量 C_{outage} 的概率等于某一给定中断概率 P_{outage} 时, 该给定的信道容量称为对应于中断概率 P_{outage} 的中断容量 C_{outage} , 即

$$P(C_{\text{inst}} < C_{\text{outage}}) = P_{\text{outage}}. \tag{16}$$

此时, 信道能以 $(1 - P_{\text{outage}})$ 的概率承载. 对中断概率为 $P_{\text{outage}} = 1\%$ 的卫星移动 MIMO 系统信道的中断容量进行计算, 采用蒙特卡洛仿真方法. 图 7 为空旷地、郊区和城市环境下分布式双极化卫星移动 MIMO 系统 (4×4 卫星 MIMO)、双极化卫星移动 MIMO 系统 (2×2 卫星 MIMO) 以及卫星 SISO (single-input single-output)

系统的信道容量.

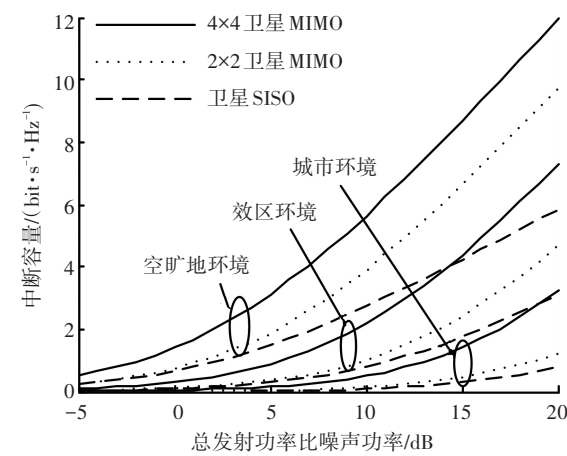


图 7 卫星移动 MIMO 系统信道容量估算

虽然卫星链路的 LOS 特性不适宜应用 MIMO 技术, 但在不同环境下, MIMO 技术都可提高卫星系统的信道容量, 并且天线数量越大 MIMO 系统会带来更大的信道容量提升. 而且, 将 MIMO 技术运用到卫星通信中时, 城市环境信道容量的相对提升最大, 郊区次之, 空旷地环境最小. 主要原因是城市环境具有丰富的散射环境.

4 结 语

本文首先建立分布式双极化卫星移动 MIMO 信道模型, 建模过程中重点对小尺度衰落信道进行了分析, 考虑多普勒频移对其影响. 随后验证了所建立的小尺度衰落模型可以保证各个子信道的统计特性不变. 通过该信道模型能够得出不同环境下分布式卫星移动 MIMO 信道系数的时间序列. 最后计算了信道的二阶统计量, 并对不同环境下卫星移动 MIMO 系统的信道容量进行了估算. 仿真结果表明, 将 MIMO 技术运用于卫星通信中能够提高系统的信道容量, 并且信道容量随着系统天线数目的增加而提升.

参考文献

[1] 李广侠, 冯少栋, 甘仲民, 等. 宽带多媒体卫星通信系统现状及发展趋势 (上) [J]. 数字通信世界, 2009, 1: 82-86.

[2] KING P R, EVANS B G, STAVROU S. Physical-statistical model for the land mobile-satellite channel applied to satellite/HAP-MIMO [C]//Wireless Conference 2005-Next Generation Wireless and Mobile Communications and Services, 11th European. Nicosia: VDE, 2005: 1-5.

[3] LIOLIS K P, GOMEZ-VILARDEBO J, CASINI E, et al. Statistical modeling of dual-polarized MIMO land mobile satellite channels [J]. IEEE Transactions on

- Communications, 2010, 58(11): 3077-3083.
- [4] 李云龙, 高晓峰. 基于射线追踪法的卫星 MIMO 信道特性研究 [J]. 现代电子技术, 2010, (13): 76-78.
- [5] YAMASHITA F, KOBAYASHI K, UEBA M, et al. Broadband multiple satellite MIMO system [C]//Vehicular Technology Conference-2005-Fall, IEEE 62nd. Dallas: IEEE, 2005, 4: 2632-2636.
- [6] FRIGYES I, HORVATH P. Polarization-time coding in satellite links [J]. IEEE Satellite and Space Newsletter, 2005, 15(2): 6-8.
- [7] KING P R, STAVROU S. Characteristics of the land mobile satellite MIMO channel [C]//Vehicular Technology Conference-2006-Fall, IEEE 64th. Montreal: IEEE, 2006: 1-4.
- [8] LIOLIS K P, PANAGOPOULOS A D, COTTIS P G. Multi-satellite MIMO communications at Ku-band and above: investigations on spatial multiplexing for capacity improvement and selection diversity for interference mitigation [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2007, 2007(2): 1-11.
- [9] PEREZ-NEIRA A I, IBARS C, SERRA J, et al. MIMO channel modeling and transmission techniques for multi-satellite and hybrid satellite-terrestrial mobile networks [J]. Physical Communication, 2011, 4(2): 127-139.
- [10] LUTZ E. A Markov model for correlated land mobile satellite channels [J]. International Journal of Satellite Communications, 1996, 14(4): 333-339.
- [11] GUDMUNDSON M. Correlation model for shadow fading in mobile radio systems [J]. Electronics Letters, 1991, 27(23): 2145-2146.
- [12] FONTAN F P, MARINO E P. Modeling the wireless propagation channel: a simulation approach with MATLAB [M]. Singapore, John Wiley & Sons, 2008.
- [13] LOO C. A statistical model for a land mobile satellite link [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1985, 34(3): 122-127.
- [14] SELLATHURAI M, GUINAND P, LODGE J. Space-time coding in mobile satellite communications using dual-polarized channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(2): 188-199.
- [15] PRIETO-CERDEIRA R, PEREZ-FONTAN F, BURZIGOTTI P, et al. Versatile two-state land mobile satellite channel model with first application to DVB-SH analysis [J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2010, 28(5-6): 291-315.

(编辑 苗秀芝)

(上接第 49 页)

- [5] TANAKA H, NATORI M C. Shape control of space antennas consisting of cable networks [J]. Acta Astronautica, 2004, 55(3): 519-527.
- [6] MEGURO A, SHINTATE K, USUI M, et al. In-orbit deployment characteristics of large deployable antenna reflector onboard engineering test satellite VIII [J]. Acta Astronautica, 2009, 65(9): 1306-1316.
- [7] MOBREM M, KUEHN S, SPIER C, et al. Design and performance of astromesh reflector onboard soil moisture active passive spacecraft [C]//Aerospace Conference, 2012 IEEE. Piscataway: IEEE, 2012: 1-10.
- [8] STEGMAN M D, FEDYK M, KUEHN S. Solar thermal vacuum testing of deployable mesh reflector for model correlation [C]//Aerospace Conference, 2010, IEEE. Piscataway: IEEE, 2010: 1-15.
- [9] CHODIMELLA S P, MOORE J D, OTTO J, et al. Design evaluation of a large aperture deployable antenna [C]//Proceedings of the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston VA: AIAA, 2006: 1-20.
- [10] 肖勇, 王三民. 环形可展开大型卫星天线结构设计与研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2001.
- [11] 关富玲, 杨玉龙, 赵孟良. 星载可展开网状天线的网面成形与防缠绕设计 [J]. 工程设计学报, 2006, 13(4): 271-276.
- [12] 邓宗全, 田大可, 刘荣强, 等. 构架式空间可展开天线结构优化参数预测模型 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(11): 39-43.
- [13] 闫军, 袁俊刚. 大型空间抛物面天线非线性有限元建模分析 [C]//全国结构动力学学术研讨会论文集. 杭州: 中国振动工程学会, 2007: 262-267.
- [14] 杨东武. 星载大型可展开索网天线结构设计与型面调整 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [15] SHABANA A A. Flexible multibody dynamics: review of past and recent developments [J]. Multibody System Dynamics, 1997, 1(2): 189-222.
- [16] DATASHVILI L, ENDLER S, WEI B, et al. Study of mechanical architectures of large deployable space antenna apertures: from design to tests [J]. CEAS Space Journal, 2013, 5: 169-184.
- [17] 肖勇, 王三民, 陈国定. 大型卫星天线系统固有模态的有限元分析 [J]. 机械设计与制造, 2006(7): 1-2.
- [18] 朱毅麟. 中国空间技术研究院的标准化卫星平台 [J]. 航天器工程, 2007, 16(1): 10-17.

(编辑 张 宏)