

MIMO技术与卫星通信的结合及在海上的应用分析

张弛 李晖*

海南大学信息与通信工程学院, 海南 570228

摘要: 卫星通信是海洋通信的重要手段, 而MIMO技术与卫星的结合可以在不增加带宽和发射功率的情况下提高系统的频谱效率, 本文列举了三种MIMO与卫星的结合方式, 分别是单卫星单地面站(双极化MIMO); 单卫星多地面站; 多卫星多地面站(分布式MIMO), 并分析了他们于海上的适用性。

关键词: MIMO; 卫星; 双极化; 分布式; 相关性; 信道容量

一、前言

我国管辖的海洋面积约为300万平方千米, 其中蕴含了丰富的资源。无论是对海洋资源的开发还是进行海上贸易, 都离不开一个重要的问题, 那就是海上通信。目前我国的海上通信在近海主要依靠地面移动通信覆盖, 距离稍远则通过特高频(Ultra High Frequency, UHF)及甚高频(Very High Frequency, VHF)频段无线电进行广播^[1]; 在远海方面通过租用国外的卫星系统, 如国际移动卫星通信系统^[2]。虽然我们拥有自主的北斗卫星导航系统, 但其功能主要是定位及导航, 其具备的短报文通信能力在通信容量和延迟方面均不能完全满足要求^[3]。

自主卫星通信网的建设有助于解决海上通信的诸多问题, 而MIMO技术可以有效地提升通信容量及频谱效率, 其与卫星的结合将有效提升其性能, 本文将列举MIMO与卫星结合的不同形式并分析其在海上的适用性。

二、MIMO 技术

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 多输入多输出, 指在通信系统的发送端将串行信号进行空时编码后通过多天线进行并行传输, 在接收端配置多个天线接收后再进行相应的空时译码, 通过利用空间这一维度来获得增益的技术^[4], 其结构如图1所示

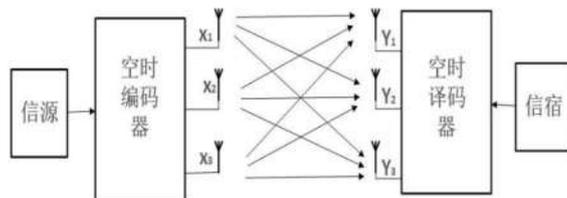


图1 MIMO系统结构

空间分集和空间复用是MIMO技术的主要优势。空间分集指通过多天线收发增强系统抗干扰性, 通常采用OSTC编码^[5]。空间复用指通过不相关的多天线信道并行传输多路数据, 提高信息传输速率, 通常采用BLAST编码^[6]。

空间分集在传输过程中拥有更高的抗衰落性能, 假设SISO的信道增益为 h , 发射信号为 x , 其接收信号为:

$$y = hx+n \tag{1}$$

由于发射的信号经过衰减, 其相位和幅度可能产生变化, 需要用导频信号对信道进行估计, 接收端根据信道估计得出均衡因子为:

$$w = \frac{h^*}{|h|^2} \tag{2}$$

其中 $\{ \}^*$ 代表复共轭, 经过均衡得到的信号为:

*通信作者: 李晖, 1977年11月, 男, 汉族, 河南叶县人, 现任海南大学信息与通信工程学院副院长, 教授, 博士。研究方向: 海洋通信、5G移动通信、海空天信息传输网络、网络信息论。

基金项目: 海南省自然科学基金高层次人才项目(2019RC036); 海南省重点研发计划高新技术项目(ZDYF2018012); 国家自然科学基金地区基金项目(61661018); 海南省自然科学基金项目(619MS029); 海南省高等学校科学研究项目(Hnky2019-8, Hnky2018-1)。

$$\bar{x} = w \cdot y = x + \frac{h^* \cdot n}{|h|^2} \tag{3}$$

等式右边第二项为接收信号的噪声，求其方差为：

$$D\left\{\frac{h^* \cdot n}{|h|^2}\right\} = \frac{D\{n\}}{|h|^2} = \frac{\sigma^2}{|h|^2} \tag{4}$$

当信道严重受损时，接收信号中噪声的方差大，影响信号的接收性能。

当采用双发射天线进行发射分集，同频同时发送信号x，假设双天线的对发射信号进行相位同步，其相位补偿因子为v₁和v₂，则接收信号为：

$$y = h_1 v_1 x + h_2 v_2 x + n \tag{5}$$

若相位补偿因子是通过导频进行信道估计得到的，即：

$$v_1 = \frac{h_1^*}{|h_1|} \tag{6}$$

$$v_2 = \frac{h_2^*}{|h_2|} \tag{7}$$

则接收信号就可以表示为：

$$y = (|h_1| + |h_2|)x + n \tag{8}$$

对幅度进行均衡便可以得到发射信号为：

$$\bar{x} = x + \frac{n}{|h_1| + |h_2|} \tag{9}$$

对噪声项求方差：

$$D\left\{\frac{n}{|h_1| + |h_2|}\right\} = \left\{\frac{\sigma^2}{(|h_1| + |h_2|)^2}\right\} \tag{10}$$

即仅当两条信道均严重受损，h₁和h₂的值都很小时，才会导致较差的接收性能。相比较于SISO技术，空间分集可以显著地提高抗干扰性能。

空间复用是将同频的不同信号流通过不同的天线发送，通过对空间资源的利用来提高信道容量。实现空间复用需要使收发天线间距大于相干距离，避免信道间的相互干扰。

在地面蜂窝通信技术的标准化过程中，已将MIMO技术列为提升无线通信容量的重要手段。从第四代蜂窝通信标准4G-LTE，到目前正在标准化的5G技术，均对MIMO技术进行了深入地研究和应用。目前MIMO技术已成为IEEE802.11n、IEEE802.16e、IEEE802.16m、IEEE802.20、IEEE802.22、3GPP2 UMB、DVB-T2等协议的标准^[7]。大规模天线技术（Massive MIMO）在可以更显著地提升频谱效率，是5G技术中的研究热点^[8]。

卫星通信由于其覆盖范围大、受地理条件限制小等特点^[9]，成为了全球通信网中重要的信息传输方式，尤其适合于地面通信难以覆盖的偏远地区和海洋。但其固有的缺陷如功率受限等限制了其传输速率的增长。MIMO技术不需要额外的发射功率和频谱效率，就能提高系统容量和频谱效率，因此卫星与MIMO方式的结合将是提升卫星通信性能的有效途径^[10]。

三、MIMO 信道模型

若考虑海上的MIMO信道，可以假设信道模型是平坦衰落并且以直射路径作为主要路径，因为在空旷环境下，直射信号的功率远大于反射或者折射信号的功率^[9]。若在发射端安装N根天线，接收端安装M根天线，传输矩阵H为：

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & \dots & h_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & \dots & h_{mn} \end{pmatrix} \tag{11}$$

其中的元素h_{mn}表示第n条发射天线到第m条接收天线间的信道增益，其值为：

$$h_{mn} = a_{mn} \cdot e^{-j \frac{2\pi f_c r_{mn}}{c_0}} \tag{12}$$

其中 c_0 为光速； f_c 为载波频率； r_{mn} 为第 n 个发射天线到第 m 个接收天线的距离， a_{mn} 的表达式为：

$$a_{mn} = \frac{c}{4\pi f_{mn}} \cdot e^{j\phi} \tag{13}$$

其中 ϕ 为载波信号的相位角。

四、MIMO 信道容量

MIMO的信道容量依据卫星的载荷是否可再生而不同，若载荷可再生，则称为再生处理转发。此时卫星将接收到的信号还原为基带信号再通过天线重新进行发送，这时卫星又成为信号发送端，信道容量分为上行信道容量即地面站到卫星，还有下行信道容量即卫星到地面站，分别进行计算，系统可容纳的信道容量为其中的较小值，信道容量的大小与设置的天线间距有关^[11]。依据文献^[12]可得再生处理转发的MIMO信道容量为：

$$C = \log_2[\det(I_M + \rho \cdot HH^H)] \tag{14}$$

其中 I_M 为单位矩阵， ρ 为平均信噪比，路径损耗均由信道增益矩阵 H 来表示。

若载荷不可再生，则称为透明转发，此时卫星将地面站发送的信号放大后直接进行转发，其功能类似于中继放大器，此时需将地面站到卫星，卫星到地面站作为一个整体来计算信道容量，假设上行地面站配置 N 根发射天线，卫星上配置 M 根天线用于信号的接收和发射，下行地面站配置 Z 根接收天线，地面站到卫星的信道增益为 H_u ，卫星到地面站的信道增益为 H_d 。根据文献^[13]可得

$$C = \log_2(\det(I_M + \rho H_u H_u^H - \rho H_u H_u^H S^{-1})) \tag{15}$$

其中矩阵 S 表示为：

$$S = I_M + \frac{\sigma_u^2}{\sigma_d^2} \cdot F^H H_d^H H_d F \tag{16}$$

σ_u^2 和 σ_d^2 分别为上行链路和下行链路的噪声功率， F 为卫星上的传递矩阵

$$F = V_d \Lambda_F U_u^H \tag{17}$$

U_u^H 和 V_d 为上下行信道进行特征值分解得到的一元矩阵

$$H_u H_u^H = U_u \Lambda_u U_u^H \tag{18}$$

$$H_d H_d^H = V_d \Lambda_d V_d^H \tag{19}$$

五、MIMO 与卫星结合形式在海上的应用

MIMO技术与卫星结合的形式，大致分为三种，分别是单卫星单地面站（双极化MIMO）、单卫星多地面站、多卫星多地面站（分布式MIMO）。下文将对其进行介绍并分析它们在海上的适用性。

（一）单地面站单卫星

单卫星单地面站，其构建方式通过卫星及地面站均搭载两个天线实现，其结构如下图2。

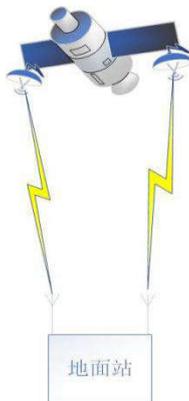


图2 单卫星单地面站

因为其搭载的天线需要满足正交极化的条件。如卫星和地面站均搭载了左旋圆极化和右旋圆极化两种天线，则其相应极化方式的发射天线发出的信号只能由相同极化方式的接收天线来进行接收。所以这种方式又被称为双极化MIMO。

双极化MIMO的结构安装简单,成本低,但在海上的适用性并不强,原因有两个:

1. 极化后的信号容易受到降雨的影响而发生去极化^[14],而海上环境相对降雨频繁,容易造成去极化,从而造成接收天线的错误接收,使系统的性能恶化。

2. 单卫星单地面站的双极化MIMO其收发天线的间距很小,若是应用于城市或比较密集的环境,发射的信号可能由于较多的散射体而通过不同的路径,信道相对独立。但是在海上环境,传输方式一般为直视路径传输LOS (Line of sight),临近天线发射的信号空间相关性较高,一旦发生衰落,均会受到影响,使系统的总体性能恶化^[15]。若取信道的相关性最大为1,两条信道的增益相同 $h_1 = h_2$,求噪声的方差,依据式(3),则有

$$D\left\{\frac{n}{|h_1|+|h_2|}\right\} = \frac{\sigma^2}{4|h_1|^2} \quad (20)$$

若信道 h_1 衰落严重,则相应的信道 h_2 也衰落严重,此时信道的相关性较大,其增益较式(10)会减小很多,但相对于单天线收发式(4),还是起到了多信号增强接收的效果。所以单卫星单地面站双极化MIMO的方式并不适用于海上。

(二) 单卫星多地面站方式

这种方式下通信系统由一颗卫星和多个地面站组成,每个地面站安装一个天线,卫星上安装两个天线。其结构如图3所示。

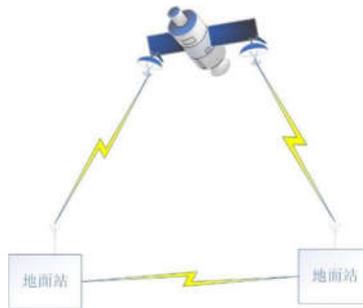


图3 单卫星多地面站

这种方式通过增大接收天线的间距来减小信道的相关性,若要实现信道容量的优化,达到最大值,则还需要满足正交性,由^[11]得:

$$r_{k1} - r_{k2} + r_{l2} - r_{l1} = \nu(k-1) \frac{c_0}{Zf_c} \quad (21)$$

r_{nm} 表示从第 m 个发射天线到第 n 个接收天线的距离,假定发射天线为2个,接收天线为 Z 个, $k, l = 1 \dots Z$, c_0 为光速, f_c 为载频, ν 为达到正交信道的周期值,为波长的倍数,且不能被 Z 整除。

假设卫星天线之间的距离为10 m,则系统上行链路地面站之间需要的最小距离为32.1 km,下行链路地面站之间的最小距离为40.9 km^[16]。地面站的稀疏部署,在军事方面对比密集部署的地面基站有着更好的抗军事打击能力,即地面站同时遭受攻击导致通信瘫痪的概率较低。但若是将其应用于海上,如此大的距离,对多个地面站位于一个海岛、油气平台或舰艇来说,会是十分困难,甚至很难实现的。且这种方式下地面端的天线间距大,卫星间的天线间距小,信道容量对于卫星端天线的变化将会很敏感,卫星的运动和偏移很容易造成信道容量的下降,不易于构建最大化的信道容量^[16]。

(三) 多卫星多地面站方式

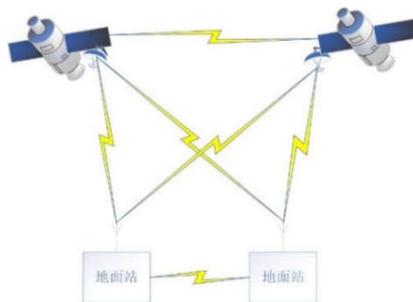


图4 多卫星多地面站

这种方式下通信系统由多颗卫星和多个地面站组成，其结构如图4。

这种构建方式下，每颗卫星及地面站通过设置单天线协作构建MIMO体系，这种方式也被称为分布式MIMO。为了构建正交信道，实现最大信道容量，两颗卫星的轨道间距需要在经度上不小于 0.5° ^[16]。

由于卫星端天线的间距较大，地面站间的间距就可以相对较小，仅需数米或者数十米，可以搭建于海岛或者海上作业平台上。这种方式较适合于海上。但分布式MIMO的最大化信道容量需要满足信道的正交性。文献^[16]里面列举了分布式MIMO信道容量下降的几种原因，分别为：延迟；卫星的运动；地面站天线的偏移。

其中延迟造成的容量下降可以通过系统设计的方法解决^[17]。卫星端由于其间距较大，只要其运动的偏移在经度 ± 37.5 km，纬度 ± 17.5 km内，就不会对信道容量造成较大的影响^[13]。地面接收端由于其天线间距较小，容易对信道容量造成影响。文献^[11]指出，天线间距的变化会影响信道容量，如图5所示。

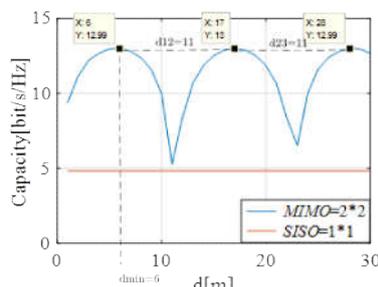


图5 信道容量随天线间距的变化

图中假设其他参数不变，仅考虑地面天线间距的变化对信道容量的影响。其中横坐标为地面端接收天线的距离，纵坐标为信道容量，可以看到，信道容量随着天线的间距的改变做周期性变化，在接收天线间距为6 m时达到第一个最大值，以11 m作为信道容量最大值变化的周期。构建正交信道，实现分布式MIMO的最大信道容量需要地面站天线较为精确的布置，为了避免地面站天线的偏移造成容量下降，可以适当减小卫星的距离，即通过增大地面站的间距降低其敏感程度。

六、总结

双极化MIMO的结构由于海上频繁降雨易造成去极化，且海上难以进行多径传输，因而不适用于海上；单卫星多地面站对地理条件限制较大，相距较远的地面站在海上难以进行同步；分布式MIMO可以将地面站安装在海岛或者海上工作平台上，较适合于海上的应用，但要实现最大信道容量，还需要满足信道的正交性，对地面站天线的位置需要进行相应的布置。

参考文献：

- [1]关田静.多体制融合的海上卫星通信网络建设研究[J].无线互联科技, 2017(18):5-6.
- [2]王文革.海上通信方式选择[J].中国海事, 2016(08):47-48+52.
- [3]田向阳,乔文长.北斗导航系统在船舶海上航行中的应用研究[J].数字技术与应用, 2017(8):54-56
- [4]Ketchum J W,Wallace M,Walton R J,et al.Pilots for MIMO communication systems[J]. 2016.
- [5]Tarokh V,Jafarkhani H,Calderbank A R.Space-time block codes from orthogonal designs[J].IEEE Transactions on Information Theory, 1999,45(5):1456-1467.
- [6]Golden G D,Foschini C J,Valenzuela R A,et al.Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture[J].Electronics Letters, 1999,35(1):14-16.
- [7]Paulraj A J,Gore D A,Nabar R U,et al.An overview of MIMO communications-Akey to gigabit wireless.Proceedings of the IEEE.92.198-218.10.1109/JPROC. 2003.821915.
- [8]Larsson E,Tufvesson F,Edfors O,Marzetta,et al.Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems.Submitted to IEEE Commun.Mag...52.10.1109/MCOM. 2014.6736761.
- [9]Evans B G.Satellite communication systems[M]//Satellite Communication Systems. 1999.
- [10]Arapoglou P D,Liolis K,Bertinelli M,et al.MIMO over Satellite:A Review[J].IEEE communications Surveys&Tutorials, 2011,13(1):0-51.
- [11]Schwarz R T,Knopp A,Ogermann D,et al.Optimum-Capacity MIMO Satellite Link for Fixed and Mobile Services[C].

Proc.WSA 2008,pp.209-216.

[12]Telatar E.Capacity of Multi-antenna Gaussian Channels[J].European Transactions on Telecommunications, 1999,10(6):585-595.

[13]Tang X,Hua Y.Optimal Design of Non-Regenerative MIMO Wireless Relays[J].IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007,6(4):1398-1407.

[14]Vasseur H.Degradation of availability performance in dual-polarized satellite communications systems[J].IEEE Transactions on Communications, 2000,48(3):465-472.

[15]Dantona V,Schwarz R T,Lankl B.Uniform Circular Arrays:the Key to Optimum Channel Capacity in Mobile MIMO Satellite Links[C]//Advanced Satellite Multimedia Systems Conference&the Signal Processing for Space Communications Workshop.IEEE, 2010.

[16]Knopp A,Schwarz R T,Ogermann D,et al.Satellite System Design Examples for Maximum MIMO Spectral Efficiency in LOS Channels[C]//IEEE Globecom IEEE Global Telecommunications Conference.IEEE, 2008.

[17]Yamashita F.et al.,Broadband multiple satellite MIMO system.Proc.VTC-2005-Fall,pp.2632-2636.