

# 海上云层和降水对船载高频段卫星通信的影响

张建飞, 丁 广, 杨建东, 滕晓云

(中国卫星海上测控部, 江苏江阴 214431)

**摘 要:** 介绍了海洋云层和降水的特点以及云层和降水对电波吸收的影响;描述了海洋层状雨和对流雨的降雨空间结构状态以及对高频段卫星通信雨衰的影响;分析了高频段卫星通信雨衰原因,指出了电磁波吸收、热噪声和去极化是影响高频段雨衰的重要方面,并针对海上工作环境特点提出了上行功率控制、频率分集、速率分集、自适应调制等抗雨衰方法。

**关键词:** 海洋; 云层; 降水; 雨衰; 卫星通信; 自适应

**中图分类号:** P426, TN927.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2018)02-0381-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.02.017

## Influence of Ocean Clouds and Precipitation to Shipborne High Frequency Band Satellite Communication

ZHANG Jian-fei, DING Guang, YANG Jian-Dong, TENG Xiao-yun

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin, Jiangsu 214431, China)

**Abstract:** Firstly we introduced the characteristics of ocean clouds and precipitation as well as their influence on electric wave absorption, and described the rainfall space structure appearance of ocean layer rain and convection rain and their influence on high frequency band satellite communication rain decline. Then we analyzed the reasons of high frequency band satellite communication rain attenuation, and pointed out that the electromagnetic wave absorption, hot noise and de-polarization are important aspects that lead to high frequency rain attenuation. Finally, considering the ocean working environment characteristics, we put forward some methods to resist rain attenuation such as uplink power control, frequency diversity, velocity diversity and self-adaptive modulation etc.

**Key words:** sea; clouds; precipitation; rain attenuation; satcom; self-adaptive

### 1 引言

高频段卫星通信以其频带宽、设备小、抗干扰性强而受到广大用户的欢迎,然而高频段卫星通信受大气环境的影响较大,尤其对远洋船船载卫通站来讲,海洋大气环境的影响将会更大,其中,降雨衰减(简称雨衰)非常严重,在工程应用中受到严重制约。

### 2 海洋气候

海洋,作为一个巨大的水分源地,在地球上的水分循环中占有十分重要的地位。从海洋蒸发到空气中的水汽占整个地球蒸发量的80%以上。这些水汽,除一部分(约占10%)补充陆地以外,其余又以降水的形式回到海洋。因此,总的来说,海洋的云量、降水比陆地多。

(1) 云层 云是悬浮在大气中的小水滴、过冷水

滴、冰晶等或它们的混合物组成的可见聚集体;有时也包含一些较大的雨滴、冰粒和雪晶。它们组成不同,形状各异,漂浮在天空中,其底部不接触地面。云的外观千姿百态,虽有共同点,但形成的物理过程也有差异。根据观测和天气预报的需要,按云的底部距地面的高度将云分成低、中、高三族;按云的外形特征、结构特点和成因将云分为十属二十九类,见表1所示<sup>[1]</sup>。

海洋上云的生成,就本质来讲,与陆地上云的生成并没有什么不同,都是由空气中的水汽在一定条件下凝结成水滴或凝华为冰晶而成的。但是,海洋上空气湿度大,水汽的凝结高度低,为云的生成提供了十分有利的条件。据统计,全球平均云量为5.4成,海洋上的平均云量为5.8成,大陆平均为4.8成<sup>[2]</sup>。在海洋的热带辐合带区域常常有许多积雨云单体组成一种热带云系,称为云团。这种云团成带状排列,可长达数千千米,在云

团经过的海区常出现大风、雷电和暴雨,有时甚至发展成热带风暴和台风。

表 1 云状分类表

云族	特 征	云属	云 类
低云	2500m 以下. 多是由微小的水滴组成. 多数低云都有可能产生降水, 其中雨层云多出现连续性降水, 积雨云多产生阵性降水, 有时降水量很大.	积云	淡积云、碎积云、浓积云
		积雨云	秃积雨云、鬃积雨云
		层积云	透光层积云、蔽光层积云、积云性层积云、堡状层积云、荚状层积云
		层云	层云、碎层云
中云	2500 ~ 3500m. 多由微小水滴、过冷水滴或者冰晶、雪晶混合而成. 高层云在夏季多出现降雨, 而在冬季多由降雪发生.	高层云	透光高层云、蔽光高层云
		高积云	透光高积云、蔽光高积云、积云性高积云、堡状高积云、荚状高积云, 絮状高积云
		卷云	毛卷云、密卷云、伪卷云、钩卷云
高云	5000m 以上. 是由微小的冰晶组成. 高云出现降水较少.	卷层云	毛卷层云、薄幕卷层云
		卷积云	卷积云

(2) 降水 从天空降落到地面上的液态或固态的水凝物称为降水(如雨、雪、冰雹等). 降水的多少用降水量和降水强度来表示. 降水落至地面后, 未经蒸发、渗透和流失, 而在水平面上积累水的深度称为降水量. 单位时间内的降水量称为降水强度, 通常主要的是测定 1h 内的最大降水量.

海洋是巨大的水体, 海上水汽含量丰富, 空气湿度大, 凝结高度比较低, 盐粒又是很好的凝结核, 因此较之陆地海上云雨多且雨量大, 甚至淡积云也能下雨. 平均而言, 海上降水量比陆上多 15% 左右.

在广阔的大洋中部, 降水分布具有明显的带状特征, 它有 3 条多雨带和 2 条少雨带. 在南北回归线之间的热带洋面, 终年高温高湿, 常有台风、热带低压以及热带辐合带等天气系统活动, 对流旺盛, 云雨频繁. 这里降水多为阵性, 降水量大, 常常出现暴雨或特大暴雨.

### 3 雨衰现象

对充水云而言, 温带纬度范围内仰角接近  $30^\circ$  的路径上于 30GHz 频率云层衰减的典型值为 1 ~ 2dB. 在更温暖的气候里, 云层通常更厚一些, 并且出现概率比温带纬度内的更大, 云层衰减也会更大一些.

电磁波在各种媒质中传播时, 会发生折射、反射、散射、色散和吸收等现象<sup>[3]</sup>. 工作于 C、Ku 和 Ka 频段的卫星通信链路上的衰减主要由信号在雨中的吸收而引起的. 在 10GHz 以上的频率上, 雨是卫星通信链路上最有影响力的传播现象. 当频率高于 20GHz 时, 大雨尤其是暴雨可能会引起非常大的信号衰减, 甚至导致通信链

路发生中断<sup>[4]</sup>.

降雨对传输信号的影响取决于雨的空间结构. 在评估降雨对车载卫星通信的影响时, 两类降雨结构是十分重要的: 层状雨和对流雨<sup>[5]</sup>.

(1) 层状雨: 在中纬度海域, 层状雨通常在几百千米水平内是分层的, 持续时间超过 1h, 降雨率小于 25mm/h, 多出现在 4km ~ 6km 的垂直高度.

(2) 对流雨: 对流雨由导致垂直传递和混合的垂直大气运动产生, 通常发生在一个水平范围只有几公里的区域内. 对流雨是局部的风暴雨, 每次的雨量和降雨率在空间的分布是不均匀的. 对流雨对应的积雨云, 其厚度很大, 顶端抵达冻结层, 在中纬度区域为 5km ~ 8km 的垂直高度, 在低纬度区域可达 10km<sup>[6]</sup>.

雨衰的大小与电磁波穿过雨区的距离远近有关, 而电磁波穿越雨区(包括云区)的路径与云层高度、云层厚度及天线俯仰角有着密切的关系, 如图 1 所示.

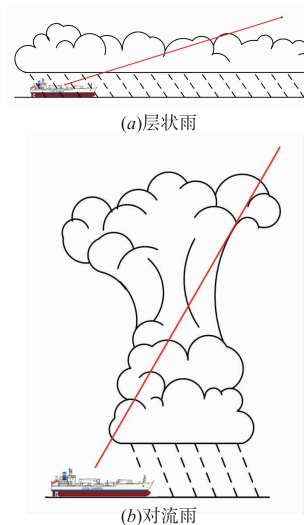


图 1 电磁波穿过雨区情况

大气中的气体分子、水汽凝结物、沙尘暴、烟雾等对卫星通信链路的电磁波传播均造成影响, 但在 Ku 和 Ka 等高频段, 雨衰是最主要的因素. 在 L、C 等频段, 雨衰并不很大, 但是随着频率的增加, 衰减值急剧增大, 如图 2 所示. 在层状雨时, 假设融化层高度为 3km, 大雨情况下, 若降雨衰减量为 1.5dB/km, 当天线仰角为  $35^\circ$  时, Ka 频段下行链路降雨衰减将达到:

$$3\text{km} \times \csc(35^\circ) \times 1.5\text{dB/km} = 7.8(\text{dB})$$

对流雨结构比较复杂, 往往是倾盆大雨, 有时也会是冰雹, 它对电磁波的衰减相当大, 尤其在雨区天线仰角较大时. 如果船舶处在热带洋面且天线仰角较大, 遇到对流雨中的大暴雨时卫星通信的信号衰减非常大, 将造成通信中断. 假设融化层高度为 8km, 大暴雨情况下, 若降雨衰减量为 10dB/km, 当天线仰角为  $70^\circ$  时, Ka

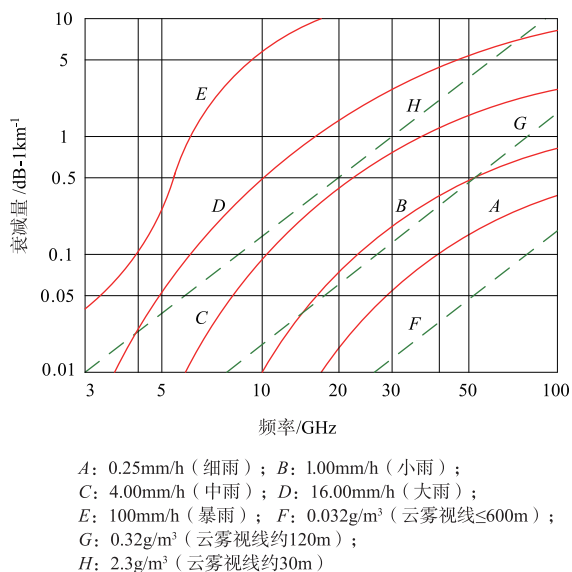


图2 降雨和云雾对电波的吸收损耗

频段下行链路降雨衰减将达到:

$$8\text{km} \times \csc(70^\circ) \times 10\text{dB/km} = 85.1 \text{ (dB)}$$

如果对雨衰估计不准,导致参数设计不合理,则会影  
响通信质量及有效性.因此,卫星通信工程设计中必须对  
雨衰倍加关注.然而,雨对电磁波传播的影响不单纯是衰  
减,还会引起噪声温度的增加和产生去极化现象.

### 3.1 电磁波吸收

雨滴直径和电磁波波长的比值与雨衰的大小具有着  
密切的关系.降雨时,电磁波作用到雨滴上时,雨滴内部  
的自由电子及束缚电荷受到外界电场力的作用而强迫震动.

当电磁波的波长比雨滴大时,主要是散射衰减;相  
反,当电磁波的波长比雨滴小时,主要是吸收损耗,但两  
者都使电磁波在传播方向遭受衰减.雨滴的半径约在  
0.25~3.0mm之间,而Ka等高频段电磁波的波长在  
13mm左右时,散射衰减起决定作用.

若雨滴的直径远小于电磁波的波长,则整个雨滴  
上的电磁场会随外场频率震荡产生二次辐射(此时将  
雨滴看成为一个等效的电偶极子),从而将投射到雨滴  
上面的一部分功率散射出去;另外,受电磁波照射,雨滴  
内部分子之间的相互作用产生阻尼效应从而转化为热能  
——即电磁波功率转化成热能而消耗掉,形成了对  
电磁能量的吸收.

由于Ka等高频段的波长与大气中雨、雪、雾的直  
径相仿,因此雨滴会对电磁波产生吸收和散射作用,造  
成信号畸变<sup>[7]</sup>.当电磁波波长接近雨滴的直径(典型值  
为1.5mm左右),电磁波的衰减将会达到最大.在Ku频  
段,虽然波长比雨滴的直径大出很多,但雨衰已经相当  
严重;到了更高的Ka频段,波长与雨滴的直径相对比  
较接近,衰减将变得非常大<sup>[8]</sup>.

### 3.2 热噪声产生

降雨对电磁波的吸收衰减会对卫星通信地球站产  
生热噪声影响,这种影响的大小和天线结构也有一定的  
关系,降雨噪声折合到接收天线输入端就等效为天线  
热噪声.电磁波穿过降雨区路径的长短决定影响的  
大小,一般情况下,天线的仰角越高,降雨噪声的影响越  
小.相反地,天线仰角越低,降雨噪声的影响越大.

### 3.3 去极化现象

降雨不仅会使电波衰减,还会产生去极化作用.降  
雨过程中,由于空气阻力和升力使雨滴变成略微扁平且  
不规则的形状,如图3所示.电磁波的入射波在雨滴的2  
个正交轴向引起的相位移称为微分相移,引起的衰减称  
为微分衰减.在通信链路中,这种降雨引起的去极化现  
象,对线极化和圆极化均有影响<sup>[9]</sup>.其原因是对于正交  
极化复用的双极化传输系统,去极化或极化偏离后会造  
成极化隔离度降低和正交极化信号互相干扰加大的问  
题.由于Ka频段波长和雨滴的大小相仿,雨滴将使信号  
发生畸变,从而对通信数据和链路造成严重影响.

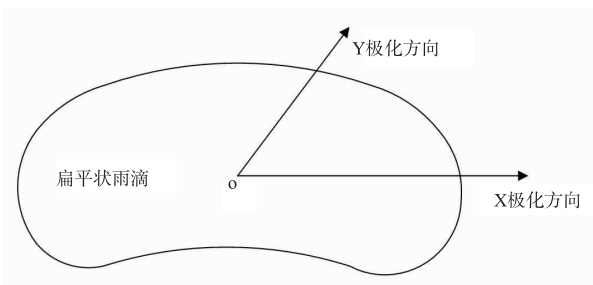


图3 扁平状的雨滴

## 4 抗雨衰方法

在C频段地球站,由于频率相对较低,通常只需预留  
一定的衰落储备就可以补偿雨衰带来的影响,因为其降  
雨引起的衰减并不是很严重.根据计算和工程实践,通常  
预留3dB的余量,就足以补偿传播过程中的损耗.

当前,随着卫星通信宽带技术的发展和用户的需求,  
卫星使用频率逐步升高,目前国内外也正在大力发展Ka  
等高频段卫星通信的应用,但雨衰是高频段卫星通信应  
用的最大瓶颈,为此,对于Ka等高频段卫星通信,必须具  
备综合性的抗雨衰措施,通过多种方式避开或补偿雨衰  
影响.国内外研究探讨的抗雨衰技术有多种方式,目前主  
要有功率控制、分集、自适应编码调制等技术<sup>[10]</sup>.对于远  
洋船来讲,应根据自身特点,综合考虑上述各种方法,同  
时研发出适合自身特点和需求的船载Ka频段抗雨衰卫  
星通信系统.

### 4.1 上行链路功率控制

对于Ku和Ka等高频段卫星链路,上行链路雨衰  
比下行链路严重得多,一般采用增大上行链路的有效

全向辐射功率 (EIRP) 的抗雨衰方式使通信链路可用率将得到较大提高。

上行功率控制就是根据动态实时检测卫星信标或其他载波信号所获得降雨衰减对卫星地面站的发射功率进行相应地调整,以抵消降雨对电磁波所造成的损耗,减少上行链路对整个链路质量的影响<sup>[11]</sup>。上行功率控制有开环、闭环和反馈环控制三种方式。

开环控制主要通过一些独立测量的方法来估计上行链路的衰减并进行发射功率控制;开环功率控制算法最关键的部分,是上行链路衰减量的估算,目前主要有两种控制的方法,一是根据接收的信标信号电平来补偿上行链路的降雨衰减,二是通过测算天线的噪声温度补偿上行链路的降雨衰减<sup>[12]</sup>。闭环控制就是地球站利用自己经过转发器转发的载波信号或地面控制中心站通过指令线路传来的信号来估计上行链路上的衰减并进行发射功率控制。反馈环控制主要是各地球站将收到的信号电平送给地面控制中心站,该地面控制中心站反过来命令网络中的各站调整其功率以补偿其自身上行链路的衰减。

#### 4.2 分集接收

分集接收是一种有效的抗信道衰落技术<sup>[13]</sup>。如果接收机能获得若干各互不相关衰落信道的同源信号,经过选择、进行解调及合并,这将有效抵制衰落的影响<sup>[14]</sup>。在这里关键的要素是各衰落信号间不相关或相关很小。分集技术主要分为位置分集技术和频率分集技术。

##### 4.2.1 位置分集

在多雨地区,降雨衰减对高频段地球站通信链路的影响很大,在这类情况下,采取位置分集是一种较好的方法。具体的做法就是在地面相隔一定距离的两个(或多个)地点设置地球站,当降雨且雨衰达到设定阈值时能自动切换到降雨衰减小的地球站进行通信。该方法不适合在海上船舶上应用,但在陆地指挥中心中央站可以采用,如图4所示。

信号的分集接收主要依靠地球上一定距离的两个地球站进行<sup>[15]</sup>。两个地球站位置相隔越远,其同时经历较大降雨的概率越小。这是因为引起严重衰减的大暴雨在空间范围上同时发生是有限的,降雨导致的衰减在两个远离的地球站是互不相关的。两个站同时中断的概率远小于一个站的中断概率,如此便增加了链路的可靠性。

当两个地球站的距离超过 20km 时,对于较大的降雨,其信道衰落可认为是不相关的。当分集方式的两个地球站的距离在 8~10km 时,就能有效提高系统的整体可用度。利用位置分集技术雨衰影响可降低 50%。

##### 4.2.2 频率分集

随着频率的增加,雨衰随之增大。通俗地讲,频率分集就是采用高频和低频分工的方式,高频段用来传输大部分

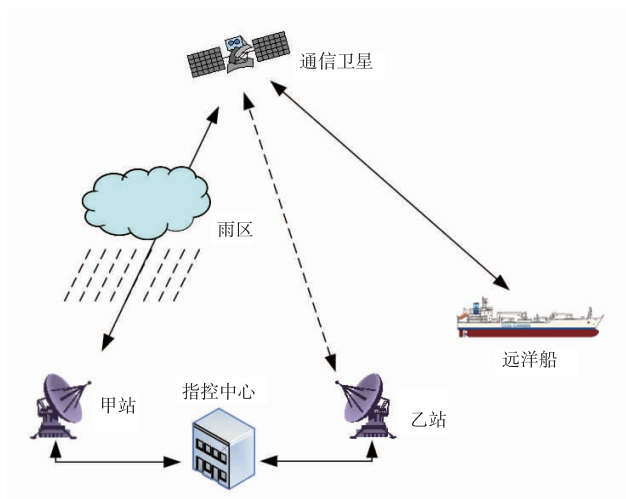


图4 位置分集技术工作原理

业务,低频段用来协助高频段链路。当降雨且高频段的储备余量不足以克服雨衰时,系统则切换到低频段。频率分集技术如图5所示,该方式对卫星通信系统的要求是每条链路既可以工作于高频段也可以工作于较低频段<sup>[16]</sup>。

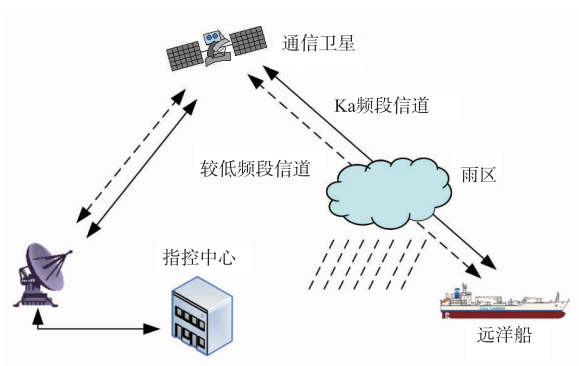


图5 频率分集技术工作原理

2013 年底,Inmarsat 发射了第五代海事卫星,实现全球(包括海洋)波束覆盖,该卫星采用 L 和 Ka 频段分集技术,用户数据传输速率最高达到 50Mbit/s。

对海上远洋船来讲,频率分集是比较有效果的一种方式。例如采用 Ka 和 C 频段分集,在采用 C 频段后天线增益下降 14dB,但在大雨中的雨衰得到改善,尤其是上行频率。以融化层高度为 8km 的大暴雨为例,如果天线仰角为 70°,此时 C 频段下行链路的最大雨衰为:

$$8\text{km} \times \csc(70^\circ) \times 0.1\text{dB/km} = 0.9(\text{dB})$$

由此看来,变换频率的效果是非常明显的。

##### 4.2.3 速率分集

速率分集技术即采用高速率和低速率分工的方式。就传输业务来讲,正常情况下使用高速率,雨衰超过一定门限时则采取低速率。这种方式在业务上有点类似于频率分集但在体制原理上是不相同的。速率分集技术应用于高低双速率链路的通信系统。速率分集方

式是通过压缩信源速率来降低门限要求以达到许可的通信业务质量,从而补偿降雨衰减的影响.其不足之处是牺牲了一定业务质量.

### 4.3 纠错编码

在抗雨衰的各种技术中,纠错编码方式是效果较好的方法之一.其核心是通过降低系统门限要求来减轻雨衰的影响,其代价是牺牲带宽.纠错编码方法可以获得典型编码增益 4dB ~ 10dB.

在带宽受限的卫星通信系统,纠错编码技术会使卫星通信容量下降,为此,必须给编码符号预留带宽才能维持系统的有限容量,这也是纠错编码技术存在的不足之处.几年前清华大学针对 ATM 接口的 Ka 频段卫星通信系统的六种编码方案进行了研究和分析,结果见表 2 所示.该研究中的六种方案看来各有特色,但实际应用中要根据各方面因素综合考虑.

表 2 针对 ATM 接口的六种编码方案性能比较

方案	编码增益	CLR 性能	码率	实现复杂度和时延
UNOM	7	一般	0.465	完全级联码,复杂
ALE	5	强	0.500	交织时延长
CASI/ALA	57	强	0.500	可调参数级联码,复杂
PCC	5	稍强	0.477	部分级联,信元内交织,复杂度和时延一般
RS-RS	23	好	0.831	复杂度低,时延小
RM-TURBO	6	好	0.600	复杂度低,时延大

### 4.4 链路自适应调整

自适应抗衰减对策是指卫星及地球站设备状态能根据天气条件、气候环境的变化而变化,使得卫星和地球站两端的接收信号电平维持在正常且合适的功率水平,同时,又尽可能减少对系统其他性能的影响.链路自适应调整是系统可靠性和经济性的综合考虑和折衷.

当前船载卫通站为传统的固定速率系统,系统通过预留余量的形式来保证岸船通信链路信号的稳定性和可靠性.实际上,自适应调整方式主要由卫星链路反向功率自动控制、前向自适应编码调制、动态信道分配等多种技术综合而成.卫星链路自适应调整可以根据链路状态实时地调整信号参数,以提升系统抗雨衰性能.

### 4.5 去极化对消

基于降雨过程中雨滴对高频段尤其是 Ka 频段信号去极化作用,在海上船舶船载站卫星通信系统中采用去极化对消技术不失为一种可行的选择.雨滴的去极化可视为一种极化干扰,可采用对消器 XPIC 来进行消除<sup>[17,18]</sup>.XPIC 的结构一般有多种,其中基于 LMS/RLS 的横向滤波器均衡对消结构、基于极化合并的均衡对消结构和基于相关对消结构等是几种常用的方法.

基于相关对消结构的方法是在天线端采用相交极

化接收和处理.由于两路信号是独立的随机过程,当干扰存在时,具有一定相关性,干扰信号乘以相关系数,便是主信道中的干扰分量.根据有关仿真实验结果,采用去极化对消技术,可使极化干扰信道的误码率改善性能增益在 3 ~ 5dB 左右.

## 5 结束语

高频段卫星通信拥有更高的带宽,能为用户提供大容量高速数据通信服务.船载高频段卫星通信受海洋大气环境的影响不容忽视,尤其是降雨的影响.为此,船载高频段卫星通信在远洋船上的应用,抗雨衰是首当其中要研究的关键问题之一.综合采用链路功率控制、分集和多种纠错编码等技术,将会取得理想的效果.通信链路自适应调整能根据天气条件、气候环境的变化而进行链路的调整,从目前实验数据来看,其中最有效果的是自适应纠错编码技术.

### 参考文献

- [1] 王强.综合气象观测[M].北京:气象出版社,2012.198-203.
- [2] 林之光,孙安健,谢清华,等.三大洋气候[M].西安:陕西人民出版社,1991.185-188.
- [3] 李磊,吴振森,林乐科,等.海上对流层微波超视距传播与海洋大气环境特性相关性研究[J].电子与信息学报,2016,38(1):209-210.  
Li Lei, Wu Zhen-sen, Lin Le-ke, et al. Study on the relativities of the tropospheric microwave trans-horizon propagation above ocean surface and the marine atmospheric environment characteristics[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(1): 209-210. (in Chinese)
- [4] Timothy Pratt et al. 卫星通信(第二版)[M].甘良才,等译.北京:电子工业出版社,2005.11.
- [5] Louis J. Ippolito Jr. 卫星通信系统工程[M].孙宝升译.北京:国防工业出版社,2012.104.
- [6] 姜世中.气象学与气候学[M].北京:科学出版社,2013.116-117.
- [7] 于淼. Ka 频段卫星通信系统雨衰特性及混合补偿技术研究[D].吉林:吉林大学,2015,6:8.  
Yu Miao. Research on rain attenuation characteristics and mixed rain attenuation compensation technology of Ka-band satellite communication system[D]. Jilin Universty, 2015, 6:8. (in Chinese)
- [8] 高化猛,李智.一种 Ka 频段海上卫星通信抗雨衰编码方案[J].舰船科学技术,2011,33(12):76-77.  
GAO Hua-meng, LI Zhi. An anti-rain attenuation encoding solution for sea Ka-band satellite communication[J]. Ship Science and Technology, 2011, 33(12): 76-77. (in Chinese)

- [9] 李平舟,车俊,杨帆. 降雨衰减及去极化效应[J]. 科技视界,2015,1:13-15.  
Li Ping-zhou, Che Jun, Yang Fan. The effects of attenuation and depolarization induced by rain[J]. Science & Technology Vision,2015,1:13-15. (in Chinese)
- [10] 钟怀东,徐慨,侯柳英. Ka 频段卫星通信上行链路自适应功率控制[J]. 计算机工程,2009,35(10):107-108,117.  
Zhong Huai-dong, Xu Kai, Hou Liu-ying. Uplink adaptive power control in Ka band satellite communication[J]. Computer Engineering,2009,35(10):107-108. (in Chinese)
- [11] 谢德芳,翁木云,郭兴阳. Ka 频段卫星上行链路开环功率控制算法研究[J]. 空军工程大学学报,2002,3(1):39-42.  
Xie De-fang, Weng Mu-yun, Guo Xing-yang. Study on arithmetic of open-loop power control about Ka band satellite communication uplink[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2002, 3(1):39-42. (in Chinese)
- [12] A C Rocha, J C Neves. Cloud and Gases Attenuation by Radiometer Measurements[A]. 11th International Conference on Antennas and Propagation[C]. 2001. 173-176.
- [13] 许通. 自由空间光通信若干关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2015,1:28-29.  
Xu Tong. Research of several key technology in free space optical communication[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications,2015,1:28-29. (in Chinese)
- [14] 李信. Ka 频段多波束卫星通信系统雨衰特性及补偿方法的研究[D]. 吉林:吉林大学,2009,5:22.  
Li Xin. The study on characteristic of rain attenuation and compensation method of Ka band multi-beam satellite communication system[D]. Jilin: Jilin Universty,2009,5:22. (in Chinese)
- [15] 王磊. 如何降低 Ku 波段卫星通信雨衰影响[J]. 科技创新与应用,2015,3:37-38.  
Wang Lei. How to reduce the impact of rain attenuation of Ku-band satellite communication system[J]. Innovation and Application of Science and Technology,2015,3:37-38. (in Chinese)
- [16] 柳长源,杨龙,卢迪. 降雨衰减对移动卫星系统通信的影响及补偿[J]. 信息技术,2004,28(6):19-20,40.  
Liu Chang-yuan, Yang Long, Lu Di. Rainfal attenuation effect to MSS communication and compensation[J]. Information Technology,2004,28(6):19-20,40. (in Chinese)
- [17] NOEL P, PROKOPTSOV M, KLEMES M, et al. The design, development and implementation of a cross ploarization interference cancellation system for point-to-point digital microwave radio system[A]. Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2011 24th Canadian Conference [C]. USA; IEEE,2011. 1365-1369.
- [18] CUSANI R, BACCARELLI E. A simple polarization recovery algorithm for dua-polarized cellular mobile-radio systems in time-variant faded environments [J]. IEEE Transactions on Vechicular Technology, 2000, 49(01):220-228.

#### 作者简介



张建飞(通信作者) 男,1960年出生,浙江兰溪人,毕业于国防科技大学,硕士,中国卫星海上测控部高级工程师. 先后从事雷达、电子仪器仪表及计量、航天远洋通信工程技术总体等工作,主要研究方向为船舶通信工程及天线伺服控制.

E-mail: zj585@163.com



丁广 男,1972出生,江苏泰兴人,毕业于复旦大学,硕士,中国卫星海上测控部高级工程师. 从事航天远洋船舶通信系统建设及设备维护改造等工作,主要研究方向为船舶卫星通信、光通信和视频通信.

E-mail: dg68@163.com

杨建东 男,1976年生,江苏扬中人,毕业于西安交通大学,硕士,中国卫星海上测控部高级工程师,从事船舶资源管理、海洋环境调查和船员培训工作,主要研究方向为船舶与海洋工程、轮机工程技术.  
E-mail: yjdjs250@163.com

滕晓云 男,1979年出生,山东莒南人,博士,中国卫星海上测控部工程师. 从事海上电磁频谱调查工作,主要研究方向为信号识别与处理.

E-mail: ieukey@163.com