

文章编号: 1001 - 893X(2012)11 - 1850 - 07

美军 MUOS 系统及关键技术分析*

倪娟¹, 佟阳², 黄国策¹, 叶向阳¹

(1. 空军工程大学 信息与导航学院, 西安 710077; 2. 空军装备研究院, 北京 100085)

摘要: 移动用户目标系统(MUOS)作为未来美军军事通信转型的重要组成部分, 能够满足美军全球范围高性能战术卫星通信能力的需求。在深入描述了 MUOS 系统构架、信息流的基础上, 分析比较了 MUOS 与地面蜂窝 WCDMA 移动通信系统, 从信道传输特性、环路传输时延以及信道衰落形式等方面指出了两者之间的差别。从空中接口、RAKE 接收、抗干扰、功率控制和无线电资源管理等方面着重分析了 MUOS 系统的关键技术, 对比地面蜂窝 WCDMA 移动通信, 指出了 MUOS 在相应技术上做的改进和区别。最后从空间段、地面段和用户段三个层面归纳了 MUOS 系统目前发展现状, 总结其未来研究趋势, 并指出我国卫星移动通信发展应借鉴的地方。

关键词: 移动用户目标系统; 战术卫星通信; 公共空中接口; RAKE 接收; 功率控制; 无线电资源管理

中图分类号: TN911.5; TN92 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.11.028

U.S. Mobile User Objective System(MUOS) and its Key Technology Analysis

NI Juan¹, TONG Yang², HUANG Guo-ce¹, YE Xiang-yang¹

(1. Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Air Force Equipment Academy, Beijing 100085, China)

Abstract: As an important part of the U.S. future military communication transformation, the Mobile User Objective System(MUOS) can satisfy the U.S. military demand of global tactical communication with high performance. On the basis of thoroughly describing the structure of MUOS and its data flow, MUOS is compared with the terrestrial cellular WCDMA system from the aspects of channel transmission characteristics, round-trip transmission delay and channel fading style, and the differences between them are pointed out. The key technologies of MUOS are analysed, including common air interface, RAKE receiving, anti-jamming, power control and radio resource management. The improvement and difference of the related technologies applied in the new system are pointed out with comparison to the terrestrial cellular WCDMA communication. Finally, the current development status of MUOS is summarized from the aspects of space segment, ground segment and user segment. What's more, the further research trends of MUOS and what we can learn from it are presented.

Key words: MUOS; tactical satellite communication; common air interface; RAKE receiving; power control; radio resource management

1 引言

护带卫星通信和宽带卫星通信^[1], 对应的频段分别

美军卫星通信分为 3 类, 即窄带卫星通信、受保

为 UHF、EHF 和 SHF。UHF 频段作为窄带卫星通信

* 收稿日期: 2012-05-23; 修回日期: 2012-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60802053); 航空科学基金资助项目(20095596016)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 60802053); The Aviation Science Foundation of China(No. 20095596016)

使用频段,凭借信号穿透力强、终端实用性强、可实现全球波束覆盖和广播联网、接入得到保证^[2]等优点,大量应用于美军无人机通信、战术数据链、巡航导弹指挥控制、广播以及后勤保障等军事行动中。

窄带卫星通信系统主要提供低数据速率的战术级卫星通信,美军现役的窄带卫星通信系统为 UFO (UHF Follow-On)。随着美军无人机数量激增,UHF 频段通信需求不断增长,而 UFO 使用寿命即将结束,能提供的通信容量已不足峰值容量的 70%,目前 UFO 用户数量已经超过了定额的 150%,并且由于干扰和误操作,信道利用率通常低于 50%^[3],且 UFO 终端庞大,携带使用不方便。因此,美军自 1999 年开始研制移动用户目标系统(Mobile User Objective System, MUOS),用于接替 UFO,成为美军下一代窄带卫星通信系统。基于此,本文对 MUOS 系统构成进行全面介绍,着重分析和研究了 MUOS 系统关键技术,以期引起广大研究者的关注,促进我国卫星移动通信的发展。

2 系统介绍

MUOS 借鉴陆地蜂窝第三代宽带码分多址(Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA)技术体制^[4],采用新的波形和算法,并与 GEO 卫星相结合,运用星地一体化设计,为用户提供全球覆盖、具有联合互操作性的超视距通信,支持语音、数据、多媒体等业务的传输,不仅能满足容量需求,也可保证通信的有效性和可靠性。

2.1 系统构架

MUOS 系统由空间段、地面段和用户段组成。空间段包括 4 颗 GEO 卫星和一颗在轨备份卫星,每颗卫星除搭载一个 MUOS 系统有效载荷之外,还搭载一个 UFO 卫星有效载荷。

地面段包括无线电接入设备(Radio Access Facility, RAF)、交换设备、网络管理设备和卫星控制设备,主要用于卫星的控制、用户语音和数据业务的管理与传输以及通信资源的管理与控制,各设备间通过高速光纤互联构成地面网络,地面网络是基于通用移动通信系统包交换域的全 IP 网络^[5],用户可通过地面网络远程接口与国防信息系统网络(Defense Information System Network, DISN)、公共电话交换网、全球信息栅格以及其他卫星通信网络相连。

用户段包括各种机载、舰载、人工背负式、手持

式移动和固定终端。MUOS 兼容原有的 UHF 终端^[6],新开发的 MUOS 终端与联合战术无线电系统(the Joint Tactical Radio System, JTRS)体系结构保持一致^[7],通常只需在原终端中嵌入 MUOS 波形即可作为 MUOS 终端通信。

2.2 信息流

MUOS 上行 UHF 链路频率为 300 ~ 320 MHz,下行 UHF 链路频率为 360 ~ 380 MHz。每颗卫星在地面形成 16 个蜂窝,系统将 20 MHz 带宽划分成 4 个 5 MHz 的卫星波束载波(Satellite Beam Carrier, SBC)分配到每个蜂窝,不同的蜂窝间可进行频率复用,同一 SBC 的所有用户在同一时刻使用相同频率通信。WCDMA 采用正交可变扩频因子(Orthogonal Variable Spreading Factor, OVSF)码进行扩频调制,不同的扩频码代表不同的波形,不同的波形区分不同的信道;采用 PN 码进行扰码调制,每个终端被分配一个独有的扰码,RAF 根据该扰码区别不同的终端^[8]。

MUOS 信息流程如图 1 所示,包括 6 个阶段:

- (1) MUOS 终端通过 UHF 上行链路向卫星发送信号;
- (2) 卫星接收信号并将其数字化后,通过 Ka 频段下行馈电链路传送到 RAF;
- (3) RAF 将信号解调、译码后,传送到最近的交换设备;
- (4) 交换设备将信号路由到 DISN(与其他网络通信时)或者与目标用户处于同一卫星覆盖区的 RAF;
- (5) RAF 通过 Ka 频段上行馈电链路将该信号发送到覆盖此 RAF 的卫星;
- (6) 卫星将接收到的信号放大,下变频到 UHF 频段,通过 UHF 下行链路将信号发送至目标用户^[3,9]。

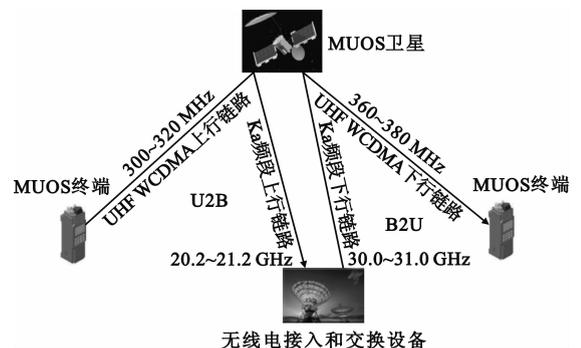


图 1 MUOS 信息流

Fig. 1 MUOS data flow

UHF 上行链路、卫星和 Ka 频段下行链路共同构成用户到基站 (User-to-Base, U2B) 链路, Ka 频段上行链路、卫星和 UHF 下行链路共同构成基站到用户 (Base-to-User, B2U) 链路。为了增强系统的稳健性, MUOS 设计时, 每颗卫星覆盖两个 RAF, 且一个 RAF 被两颗卫星覆盖。在系统工作量的约束下, 为了提高容量, RAF 应尽量将工作量均匀分散到每个

卫星波束, 同时卫星也应将工作量均匀分散到每个 RAF^[9]。

2.3 MUOS 与地面蜂窝 WCDMA 系统区别比较

MUOS 与地面蜂窝 WCDMA 系统的区别主要体现在信道特性和端对端传输时延上, 将其总结如表 1 所示。

表 1 MUOS 与地面蜂窝 WCDMA 系统传输比较

Table 1 Transmission comparison between MUOS and the terrestrial cellular WCDMA system

信道	使用频段	多普勒频率偏移	多普勒频率扩展	相干时间	多径时延扩展	环路传输时延	衰落形式
MUOS 信道	UHF 频段	比 S 频段 WCDMA 大约小 6 倍	比 S 频段 WCDMA 大约小 6 倍	典型的 MUOS 系统相干时间为 100 ms 或更长, 是地面系统 WCDMA 的 6 倍	卫星仰角所导致的多径时延扩展比地面蜂窝的地面传输要小得多, 通常时延扩展小于 1 chip, 信道最差情况下不大于 3 个 chip	约为 540 ms	卫星波束一齐衰落
地面蜂窝 WCDMA 信道	S 频段	比 S 频段 WCDMA 大约小 6 倍	比 S 频段 WCDMA 大约小 6 倍	高速移动载体的相干时间为 1 ms 量级	2~5 μ s 或 8~20 个 chip 且在这个宽时延扩展窗中有很强的孤立多径时延	亚毫秒级	信道独立衰落

MUOS 将 3G WCDMA 作为其波形定义的基础^[10,12], 并大量运用第三代移动通信关键技术。实际操作过程中, 需根据 MUOS 卫星信道特点和实际需求, 对 3G WCDMA 波形和相关技术进行适当的修改和创新。这些技术包括空中接口技术、RAKE 接收技术、波束成形技术和功率控制技术等。

3 系统关键技术

3.1 空中接口技术

公共空中接口 (Common Air Interface, CAI) 是为了标准化卫星与终端之间通信波形而定义的^[11]。信道的相干时间越大, 对支持物理层信令传输和接收机跟踪算法的专用物理控制信道 (Dedicated Physical Control Channel, DPCCH) 功率要求越低。MUOS UHF 信道相干时间约为陆地蜂窝系统的 6 倍, 因此可以降低控制信道的功率开销, 提高数据信道的承载容量。与典型的陆地蜂窝 WCDMA 系统相比, MUOS 波形设计时, 降低了 DPCCH 和公共导频信道 (Common Pilot Channel, CPICH) 功率。在 U2B 方向, DPCCH 功率降低了 7 dB; B2U 方向, CPICH 功率降低了 10 dB^[12]。

MUOS 信道相干时间大于 100 ms, 而 WCDMA 物理层最大传输时间间隔 (Transmission Time Interval, TTI) 为 80 ms, 因此要在 U2B 链路利用时间分集技术

必须增大传输时延。MUOS 在 WCDMA 调制子层和编码合成传输信道之间插入了楔形交织 (Dovetail Interleaving, DTI), 将 8 个 TTI 进行帧交织^[9,12], 传输时间间隔增大到 640 ms, 实现了长相干时间 UHF 信道的时间分集技术。

MUOS 作为军事系统, 其严格的数据速率要求决定了 B2U 链路速率匹配算法与陆地 WCDMA 系统中使用的算法存在差异。MUOS B2U 速率匹配算法要考虑误块率、信息重传和周期性的优先控制等因素, 因此要求传输格式组合 (Transport Format Combination, TFC) 中的数据速率高于额定速率。MUOS 修改了 3G WCDMA B2U 链路速率匹配算法, 将 TFC 分为额定值和扩展值。额定 TFC 发送额定数据速率, 在未满载的 TFC 中插入不连续发射比特, 类似于陆地蜂窝 WCDMA 下行链路速率匹配算法; 扩展 TFC 则完全利用所有可用的专用物理数据信道 (Dedicated Physical Data Channel, DPDCH) 比特进行速率设定。仿真实验证明运用该改进的速率匹配算法, 能有效地克服性能下降^[12]。

3.2 RAKE 接收技术

RAKE 接收机通过相干合并每个信道接收到的能量来对抗多径衰落。MUOS 系统中, RAF 和用户终端都使用了 RAKE 接收技术, 仿真实验和硬件测试均表明 RAKE 接收技术在大量可变的 UHF 卫星通信信道中能发挥很好的性能。

由空中接口技术可知,为最大限度地提高容量,将 DPCCH 功率电平设置比地面 WCDMA 系统中的典型值低 7 dB。专用导频符号是 DPCCH 的一部分,主要用于信道估计,相当于“训练序列”,RAKE 信号处理也是针对专用导频符号进行的,处理后一方面对信道进行估计,控制查找器时延,另一方面计算出组合权向量,将不同 DPDCH 数据流组合成单一数据流^[13-14],如图 2 所示。专用导频符号功率过低,通过信道后信干比过低将影响 RAKE 信号处理的性

能。为解决这一问题,需要增大信道跟踪时间常数,由此增加的信道跟踪处理增益能减轻专用导频符号信干比的降低。实际中,信道跟踪时间常数受到信道相干时间和频率跟踪性能的限制,MUOS 信道相干时间长,因此 MUOS RAKE 接收机的信道跟踪时间常数只受到频率跟踪性能的限制。为了提高频率跟踪性能,MUOS RAKE 接收机使用了最大似然算法的频率估计技术、在频率估计前增加预检测数据积分以及延长频率跟踪环时间常数等方法^[14]。

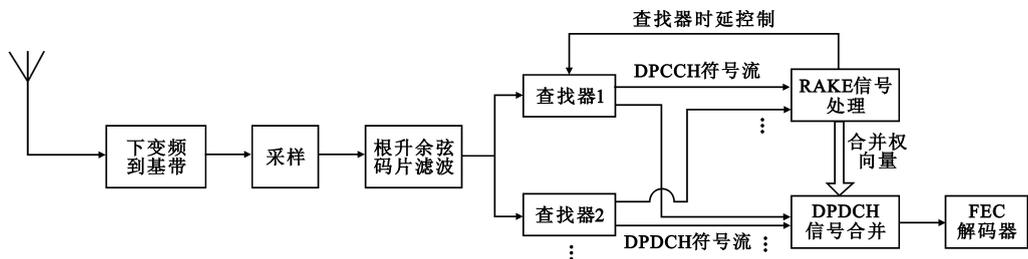


图 2 RAKE 信号处理框图

Fig.2 Schematic diagram of RAKE signal processing

相对于理想的 RAKE 接收机,MUOS 系统 RAKE 接收机设置的性能余量非常小,在最佳信道上允许有 0.75 dB 的余量,而在恶劣的信道上允许有 2.0 dB 的余量。比较起来,对高速移动体而言,地面 WCDMA 系统理想 RAKE 接收机余量设置通常大于 3.0 dB。

RAKE 接收机中有多个查找器,如图 2,每个查找器都通过时延编码或推进数据调谐到一个多径时延,并对 I/Q 多路传输的 DPDCH 和 DPCCH 进行解扰、解扩,产生 DPDCH 和 DPCCH 数据流。A. J. Viterbi 介绍了一种常规的 RAKE 接收机,该接收机采用一种“放置后跟踪”查找器管理范例。该查找器工作时时延跟踪时间常数必须大于信道跟踪时间常数^[15],但 MUOS 系统即使在最坏的情况下,时延跟踪时间常数也很难靠近信道跟踪时间常数,因此,MUOS RAKE 接收机采用一种非常规的查找器管理方案——“静态查找器范例”,这种查找器不会动态跟踪时延,并与多径响应峰值不存在直接关系,它消除了时间跟踪和信道跟踪之间的交互作用,不需要过多查找器覆盖脉冲响应,满足 MUOS 信道非常严格的时延扩展要求。但“静态查找器范例”不能使用简单的信道跟踪来对信道进行估计,因为 MUOS 导频功率非常弱,查找器噪声成为信号处理过程中噪声产生的主要来源,为了抑制查找器噪声,MUOS 引入信道识别算法和交叉查找器滤波的概念。新算法

的引入会导致计算量增大,但 MUOS 信道长相干时间可以接受系统信号处理速率的下降。

3.3 抗干扰技术

限制 MUOS 容量的两个最重要因素是 UHF 带宽和干扰。干扰分为内部干扰和外部干扰,内部干扰指 WCDMA 体制下的多路接入干扰 (Multiple Access Interface, MAI),外部干扰指严重拥塞在 MUOS 使用的 UHF 频段的一系列信号,包括视距通信信号、雷达信号、无线电导航信号和商用电视信号^[9]。MUOS B2U 链路干扰包括多径干扰、B2U 频段内的外部干扰和 MAI^[16]。信道中 UHF 信号多径传输产生了频率选择性衰落,接收端对多径信号的抗干扰处理会降低信号间的正交性,产生 MAI。U2B 链路干扰包括 U2B 频段内外部干扰和 MAI^[17]。为了降低 MAI,系统采用功率控制和无线电资源管理^[9,18]两种技术。对于外部干扰,功率控制技术和 WCDMA 体制的运用使得 MUOS 用户能与许多其他用户共享信道,且共享后对两者都没有严重的性能影响。

MUOS U2B、B2U 链路抗干扰均采用自适应信号处理技术,RAF 信号处理降低 UHF 上行链路外部干扰,终端自适应滤波器降低 UHF 下行链路外部干扰。为遵守主办国家协议,避免与附近的其他通信系统干扰,MUOS 终端能在发送信号中采用陷波 (Spectral Notching) 技术,5 MHz 信道中,大约几百千

赫的频段能在预测到严重性能下降之前被陷波^[19]。接收机使用频谱白化(Spectral Whitening)技术,在解调器中降低干扰功率,以很低的有用信号功率损失为代价实现抗干扰^[17]。功率控制环路能自动调整发送信号功率,以补偿发生的任何信号衰落^[9]。

3.4 功率控制技术

在保证服务质量的前提下,功率控制技术通过尽可能降低不断变化信道中的上下行链路功率,达到降低 MAI、提高系统容量的要求。WCDMA 功率控制分为内环和外环,其中内环主要跟踪信道增益变化以获得目标信噪比,外环主要监控通信性能并调整目标信噪比。MUOS U2B 和 B2U 链路均采用闭环功率控制,终端只需发送完成 UHF 上行链路所需功率,卫星也只需发送完成 UHF 下行链路所需功率。MUOS 与 3G WCDMA 陆地蜂窝系统应用类似的功率控制环,不同的是, MUOS 端对端通信有约 540 ms 的环路传输时延,因此功率控制更加复杂,如图 3 所示。为了解决延时的问题, MUOS 使用陆地蜂窝中没有的两个重要技术:第一,基于目前和过去的衰落值,内环使用简单自由度线性预测器预测未来 540 ms 的信道衰落状态,获得预测的目标信干比(Signal Interference Ratio, SIR);第二, MUOS 外环在每个 10 ms 帧上获得一系列 SIR 测量值估计瞬时误块率(Block Error Rate, BLER)^[20],调整目标 SIR。

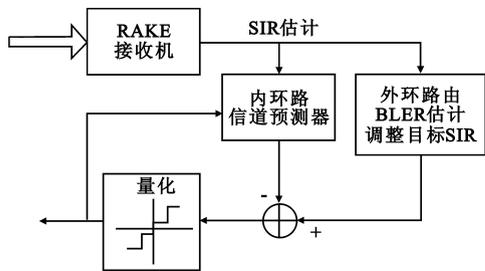


图3 MUOS功率控制结构

Fig. 3 Structure of MUOS power control

3.5 无线电资源管理技术

在任何 CDMA 系统中,有效的无线电资源管理(Radio Resource Management, RRM)技术都能为用户分配信元、波束、载波和编码,从而降低 MAI,增加系统容量^[18]。RRM 是将用户分配到具有最佳传输环境(更高的天线增益或者更低的 MAI)的卫星波束载波中,从而降低整个链路所需功率,达到降低 MAI 的目的。

MUOS 系统中信元覆盖区域广、卫星下行链路功率有限、上下行链路波形不同以及群通信的要求,RRM 更加复杂。系统提供了两种无线电资源管理算法,预先计划无线电资源管理(Pre-Plan Radio Resource Management, PPRM)和动态无线电资源管理(Dynamic Radio Resource Management, DRRM)。其中,PPRM 用于群网络通信,DRRM 用于点对点通信。

MUOS B2U 和 U2B 链路设计不同,RRM 优化策略不同,两个方向的优化有时会引起冲突,因此,无线电资源优化时应当兼顾两条链路,并且留出适当的余量,才能使系统整体容量达到最大。B2U 下行链路采用 OVSF 编码设计,影响该链路容量的干扰有三部分:一个卫星波束载波内的干扰 I_{OR} 、一颗卫星相邻波束使用同一载波频率引起的干扰 I_{OB} 和覆盖相同区域不同卫星的波束使用相同载波频率引起的干扰 I_{OS} 。 I_{OR} 因多径引起信号正交性减弱而产生,相对于另两种干扰来说通常很小;处于波束边界的用户受到的 I_{OB} 影响比较严重,波束中心周围的用户几乎不受 I_{OB} 影响; I_{OS} 干扰比 I_{OB} 严重,采用定向天线可以降低 I_{OS} 干扰。U2B 上行链路使用非正交编码,分配同一载波频率的所有用户之间相互干扰,即产生 MAI。当 MAI 比噪声干扰高 6 dB 以上时,终端将会因为没有足够功率克服 MAI 而关闭该链路。

PPRM 使用预报公式预测 U2B MAI 和 B2U 功率消耗,模拟 MUOS 通信计划流程,并根据该流程预先为群用户完成最终的卫星波束载波分配。PPRM 使用“填充和溢出”与“循环复用”两种方法分配卫星波束载波^[21],群通信时所有用户必须被分配到一个波束的相同载波中,否则会造成功率浪费。DRRM 要求用户采用最小的发射功率,将每个用户分配到有足够 OVSF 编码的传输环境最佳的卫星波束载波上。

4 结论与展望

4.1 发展现状

从空间段来看, MUOS 系统的第一颗卫星于 2012 年 2 月成功发射升空,第二颗卫星发射后, MUOS 将形成初步通信能力。第二颗卫星发射成功后,美军方将按照每年发射一颗卫星的进度发射后续的 3 颗卫星。目前,第一颗卫星正在太平洋中部地区上空进行在轨测试,第二颗卫星正在空间模拟环境中测试性能,第三颗卫星准备进行环境测试,剩余两颗卫星还在制造过程中。

从地面段来看,位于夏威夷的 RAF 已经建成,目前在位于西西里的 RAF 进行软硬件安装和测试,整个 MUOS 地面 IP 网络预计将于 2013 年建成。

从用户段来看,MUOS 终端的设计开发由 JTRS 负责。JTRS 为 MUOS 研发了两种类型的终端,JTRS HMS 和 JTRS AMF。2012 年 2 月,美国通用动力 C4 系统使用首个嵌入 MUOS 卫星通信波形的 JTRS HMS 型双通道网络电台 AN/PRC-155,率先完成了话音和数据信息的安全发送。预计 2012 年底 MUOS 波形将装备到该电台中,届时该电台将成为首个开发成功为士兵所用的 MUOS 终端。按计划 MUOS 波形也将嵌入到 JTRS AMF 型终端中,以完成 UHF 窄带卫星通信,目前具体型号未定,该终端预计在 2014 年具备初始作战能力。虽然 MUOS 支持手持终端,但是目前尚未研发相关的手持终端。另外,RT-1939(C)和 AN/PRC-171G 等电台中也预备嵌入 MUOS 波形,实现 UHF 窄带卫星通信。

4.2 未来展望与发展建议

由于 MUOS 系统中所有的信号处理过程都在地面完成,因此在不改变目前卫星星座的前提下,通过引进先进技术提高系统的性能和容量的方法可行性很高,这也是未来几年美军优化 MUOS 系统的主要研究方向。相关新技术包括:时间同步 WCDMA 系统;通过多波束和多卫星处理消除强干扰;多用户检测;改进的编译码技术;使用 4G 商业蜂窝技术。MUOS U2B 仿真工具能有效评估上述技术对 MUOS 性能的影响,政府可对每种方案进行效费比分析。另外,MUOS 项目办公室还计划在 MUOS 现有频段基础上增加 20 MHz 的上下行链路带宽,用来支持第二个 MUOS 卫星星座^[9]。

我国应重视卫星移动通信的建设研究。技术上,应重视将民用技术和体制应用到军事系统建设中,并加强基础性新技术的研究。应用上,应学习借鉴美军的建网模式和资源优化管理方式。

目前,商用通信系统逐步趋于完善,技术体制日益成熟,通信容量大大增加,性能更加优越,将民用技术应用到军事通信系统中,可降低研究成本,加快开发速度,也会大大提高效能。MUOS 是美军首个借鉴 3G WCDMA 技术体制的军事卫星移动通信系统,对于我国卫星移动通信发展而言,应注重时分同步码分多址(Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access, TD-SCDMA)及其演进系统在战术卫星通信中的应用研究。TD-SCDMA 是我国拥有自主

知识产权的第三代移动通信技术体制,其关键技术和核心专利为我国所有,将 TD-SCDMA 应用到卫星移动通信中将为我国开展未来卫星移动通信的自主研发创造很好的平台。同时,从卫星通信长远发展来看,星上信号处理、天线抗干扰、空间 IP 互联网和星间激光链路等新技术的应用将会对卫星通信的性能带来巨大的改善。因此,应不断地加强基础性新技术的研究工作。

美军将天基网络与陆基网络融合,形成天地一体化发展。同时,资源分配方式上使用动态资源管理,增加了系统容量。在信息化迅速发展的今天,我国在建设卫星移动通信系统时,也应加强各种网络平台的融合和资源的动态分配,更好地发挥联合作战的效果。深刻理解美军的卫星移动通信系统的建设和相关技术,能为我国未来的卫星移动通信发展提供重要的借鉴意义,同时也为对其实施干扰、打击和摧毁发挥重要作用。

参考文献:

- [1] Fritz D A, Doshi B T, Oak A C, et al. Military Satellite Communications: Spaced-Based Communications for the Global Information Grid [J]. Johns Hopkins Application Technical Digest, 2006, 27(1): 32-40.
- [2] Ingerski J, Sapp A. Mobile Tactical Communications, the Role of the UHF Follow-On Satellite Constellation and its Successor, Mobile User Objective System[C]// Proceedings of 2002 Military Communication Conference. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2002: 302-306.
- [3] 李子木. 美海军 UHF 卫星通信系统研究[J]. 电信快报, 2010(1): 13-18.
LI Zi-mu. Research on US Navy UHF Satellite Communication System[J]. Telecommunications Information, 2010 (1): 13-18. (in Chinese)
- [4] Nicholson J. Status of the Mobile User Objective System [C]// Proceedings of 2006 Military Communications Conference. Washington DC, USA: IEEE, 2006: 1-4.
- [5] Bawor A. Beyond Raw IP: MUOS Architecture as a Platform for Future Services[C]// Proceedings of 2007 Military Communications Conference. Orlando, FL, USA: IEEE, 2007: 1-7.
- [6] Blaydoe M, Mogor R, Wade R. An Evaluation of MUOS Support to Legacy UHF Terminals [C] // Proceedings of 2006 Military Communications Conference. Washington DC, USA: IEEE, 2006.
- [7] Curies W W, Curry L T. Mobile User Objective System Program Overview[C]// Proceedings of 2002 Military Communications Conference. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2002, 1: 290-295.

- [8] Matassa C K. Comparing the Capabilities and Performance of the Ultra High Frequency Follow-on System with the Mobile User Objective System [D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2011.
- [9] Oetting J D, Tao Jen. The Mobile User Objective System [J]. Johns Hopkins Apl Technical Digest, 2011, 30(2): 103 – 112.
- [10] Huckell G, Tirpak F. What the Mobile User Objective System Will Bring to UHF SATCOM [C]// Proceedings of 2007 Military Communications Conference. Orlando, FL, USA: IEEE, 2007: 1 – 4.
- [11] Huckell G R, Parsons J F. Application of Key Integrated Waveform Features to the Specification of the MUOS Common Air Interface (CAI) [C]// Proceedings of 2002 Military Communications Conference. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2002: 344 – 349.
- [12] Sadowsky J S, Lee D K. The MUOS-WCDMA Air Interface [C]// Proceedings of 2007 Military Communications Conference. Orlando, FL, USA: IEEE, 2007: 1 – 6.
- [13] Sadowsky J S. WCDMA Physical Layer Modeling for the MUOS Project [C]// Proceedings of 2008 Military Communications Conference. San Diego, CA, USA: IEEE, 2008: 1 – 7.
- [14] Sadowsky J S. The MUOS Base Station Rake Receiver [C]// Proceedings of 2008 Military Communications Conference. San Diego, CA, USA: IEEE, 2008: 1 – 7.
- [15] Viterbi A J. CDMA: Principles of Spread Spectrum Communications [M]. Addison-Wesley, 1995.
- [16] Okrah P, Bahr R K. Channel and Interference Mitigation in the MUOS Base-to-user Link [C]// Proceedings of 2008 Military Communications Conference. San Diego, CA, USA: IEEE, 2008: 1 – 5.
- [17] Bahr R K, Lee D K. MUOS U2B Interference Mitigation Analysis [C]// Proceedings of 2007 Military Communications Conference. Orlando, FL, USA: IEEE, 2007: 1 – 7.
- [18] Butts N. MUOS Radio Resource Management Algorithms [C]// Proceedings of 2008 Military Communications Conference. San Diego, CA: IEEE, 2008: 1 – 7.
- [19] Spooner C M. Filterbanks for Adaptive Transmit Filtering [C]// Proceedings of 2007 Military Communications Conference. Orlando, FL, USA: IEEE, 2007: 1 – 8.
- [20] Zunich G, Sadowsky J S, Butts N, et al. MUOS Point-to-Point Power Control [C]// Proceedings of 2009 Military Communications Conference. Boston, MA, USA: IEEE, 2009: 1 – 5.
- [21] Butts N. MUOS Dynamic Radio Resource Management Algorithms [C]// Proceedings of 2011 Military Communications Conference. Baltimore, Maryland, USA: IEEE, 2011: 1 – 5.

作者简介:

倪娟(1988—),女,湖北黄冈人,2010年于空军工程大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为卫星移动通信技术;

NI Juan was born in Huanggang, Hubei Province, in 1988. She received the B. S. degree from Air Force Engineering University in 2010. She is now a graduate student. Her research concerns mobile satellite communication technology.

Email: nijuan_19881104@163.com

佟阳(1964—),男,辽宁辽阳人,高级工程师,主要研究方向为军事通信网;

TONG Yang was born in Liaoyang, Liaoning Province, in 1964. He is now a senior engineer. His research concerns military communication network.

黄国策(1962—),男,陕西高陵人,教授、博士生导师,主要研究方向为军事通信网;

HUANG Guo-ce was born in Gaoling, Shaanxi Province, in 1962. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns military communication network.

叶向阳(1970—),男,湖北黄冈人,高级实验师,主要研究方向为卫星通信和短波通信。

YE Xiang-yang was born in Huanggang, Hubei Province, in 1970. He is now a senior lab technician. His research interests include satellite communication and HF communication.