

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.05.001

引用格式:罗华.大容量且抗干扰能力强的卫星通信星状组网方案[J].电讯技术,2014,54(5):529-533. [LUO Hua. Star Topology Satellite Communication Networking Proposal with High Throughput and Anti-jamming Capability[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(5): 529-533.]

# 大容量且抗干扰能力强的卫星通信星状组网方案\*

罗 华\*\*

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

**摘要:**在兼顾网络容量和抗干扰性能的基础上,提出了一种卫星通信星状组网方案。介绍了抗干扰传输波形、网络结构和工作原理,对用户容量和抗干扰性能进行了理论计算。计算结果表明:直扩模式下单路转发器用户容量约360,跳频模式下单路转发器用户容量为120~400,并且具备较强抗干扰能力。相关组网方案对工程应用具有一定的参考价值。

**关键词:**卫星通信;星状组网;直接序列扩频;跳频;用户容量;抗干扰性能

**中图分类号:**TN927      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-893X(2014)05-0529-05

## Star Topology Satellite Communication Networking Proposal with High Throughput and Anti-jamming Capability

LUO Hua

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** A proposal for star topology satellite communication (SATCOM) network is designed based on tradeoff between network throughput and anti-jamming capability. The anti-jamming transmission waveform, network structure, and operational principle are introduced and user capacity and anti-jamming capability are theoretically computed. The computed result shows that the user capacity for one channel transponder is about 360, and 120 ~ 140 at direct sequence spread spectrum (DSSS) mode and frequency hopping (FH) mode respectively, and the proposal is of high anti-jamming capability. The networking proposal is valuable for engineering practice.

**Key words:** satellite communication; star network; DSSS; FH; user capacity; anti-jamming capability

### 1 引言

卫星通信具有覆盖范围广、传输距离远、传输媒介稳定、通信容量大等优点,是实现超视距通信的重要手段。

随着卫星通信的不断发展,大量用户组网应用成为常用方式,对组网方案的研究也逐渐成为热点。已有研究成果主要集中在提高资源利用率、扩大用户容量方面,忽略了系统抗干扰能力。抗干扰能力关系着卫星通信的可靠性,是组网应用必须考虑的

一个重要方面。

用户容量、抗干扰能力、带宽资源三者相互制约,在进行系统设计时需平衡三者关系,折衷考虑。本文以星状网络为基础,综合考虑上述三方面因素,提出了一种卫星通信组网应用方案,并对用户容量和抗干扰性能进行了理论分析和计算。

### 2 多址接入方式分析与比较

研究人员提出了多种卫星通信多址接入方式,

\* 收稿日期:2014-04-01;修回日期:2014-04-29      Received date:2014-04-01;Revised date:2014-04-29

\*\* 通讯作者:luohua7940@sina.com      Corresponding author:luohua7940@sina.com

主要有频分多址(FDMA)、时分多址(TDMA)、码分多址(CDMA)、随机接入(ALOHA)和多频时分多址(MF-TDMA)等5种。

### (1) FDMA 系统

在 FDMA 组网应用系统中,通信双方各分配一段频率资源,形成多个相互不重叠的子频率带,相互之间用保护频带分离。当多个用户同时使用卫星转发器时,使用不同的频带进行通信。

### (2) TDMA 系统

在 TDMA 系统中,所有用户使用同一个载波进行相互间的通信。载波按照时间划分为时隙,多个时隙构成一帧。每帧设置一个时隙用于参考主站发送参考基准突发,各用户以此作为时间基准,在指定的时隙发送业务突发信号,并保证各用户发送的突发信号按照规定的时间顺序依次通过卫星。

### (3) CDMA 系统

在 CDMA 系统中,各用户发送的信号在时间、频带上相互重叠,利用自相关性能好而互相关比较弱的周期性码序列作为地址码,对被用户信息调制

过的载波进行再次调制,使其频谱展宽。在接收端以本地产生的一致地址码为参考,根据相关性的差异对接收到的信号进行筛选,找出地址码与本地地址码完全一致的宽带信号并还原为窄带,其他无关信号全部滤除。

### (4) ALOHA 系统

在 ALOHA 系统中,各用户共用同一段卫星转发器频率,在时间上随机发送信息。ALOHA 系统全网不需要定时和同步,各用户发送时间完全随机。当用户较少且各用户发送的信息量不大时,ALOHA 系统可以很好地工作<sup>[1]</sup>。

### (5) MF-TDMA 系统

MF-TDMA 采用 FDMA 与 TDMA 相结合的二维多址方式,每个载波容纳一个用户群,每个用户占用帧结构的不同时隙,通过发送或接收频率的跳变实现不同用户群之间的业务互通,从而构成多个用户群组成的通信网。MF-TDMA 网络内各个用户的发射时隙是彼此不同的,但必须有准确的时隙同步<sup>[2]</sup>。

表 1<sup>[3]</sup> 是各种组网应用方式的比较。

表 1 各种组网应用方式比较  
Table 1 Comparison of different networking mode

组网方式	优点	缺点	适用场合
FDMA	技术成熟,实现简单	需进行功率输出补偿,卫星转发器功率利用率低;设置保护频段,频率利用率低,用户容量受限	用户少、通信业务实时性强、速率恒定
TDMA	用户容量较大,卫星功率和频率利用率高	需全网精确同步,设备实现复杂,成本较高,系统鲁棒性差	用户多、通信业务实时性不强,速率恒定
CDMA	具有一定的抗干扰能力	需对各用户进行严格功率控制;受多址干扰影响,用户容量受限	通信业务速率低、有抗干扰需求
ALOHA	实现简单	用户容量小,当信道负荷较高时,时延大、效率低	用户少、业务量小、突发业务
MF-TDMA	用户容量较大,卫星功率和频率利用率高;通信对象可逐时隙切换,灵活方便	需全网精确同步,设备实现复杂,成本较高,系统鲁棒性差	用户多、通信业务多样化、多种速率需求、多点对多点通信

## 3 组网应用系统设计

### 3.1 设计思路

在星状网络中,所有用户的通信对象都是同一个中心站。由于卫星转发器可提供的功率和频带均受限,直接制约着用户容量,因此需要合理设计信道多址接入方式,以避免众多用户相互冲突、相互干扰。另一方面,考虑到卫星通信链路的脆弱性,在进行系统设计时还应采取一定的抗干扰措施。

根据第 2 节的比较和分析可知,每种多址接入

方式都不能很好地兼顾用户容量和抗干扰性能。本文将多种方式有效结合,相互补充,设计混合接入方式,以满足大容量用户和抗干扰通信的需求。

### 3.2 系统方案

#### 3.2.1 工作频段

卫星通信系统的用户容量、抗干扰能力与工作频段密切相关。与低频段相比,微波、毫米波等高频段卫星通信工作频段宽,用户容量大,更能满足大容量用户组网通信需求。

与微波相比,毫米波频段在抗干扰方面具有以下优势:

(1) 天线方向性更强,具有更高的空间分辨率,对来自通信方向以外的干扰信号具有较强的空间抑制,提高系统抗干扰能力;

(2) 卫星转发器带宽更宽,扩频处理增益更高,通信抗干扰能力更强;

(3) 频段越高,干扰机越难以实现大干扰功率,间接增加了干扰难度。

综上所述,对于数量较多且对链路抗干扰性能有较高要求的用户,毫米波是较好的工作频段选择。

### 3.2.2 抗干扰波形

现阶段,常用的抗干扰传输波形有直接序列扩频(DSSS)和跳频(FH)两种。随着通信干扰样式向宽带化、大功率化、多样化方向发展,要保证卫通链路的可靠性,需要根据不同使用环境,选择恰当的传输波形。本文分别在直接序列扩频和跳频两种工作模式下对多址接入方式性能进行分析。

### 3.2.3 网络结构

星状网络结构如图 1 所示,系统由 1 个中心站和多个用户群组成,每个用户群包含多个用户。系统设置 1 条前向信道和多条返回信道。

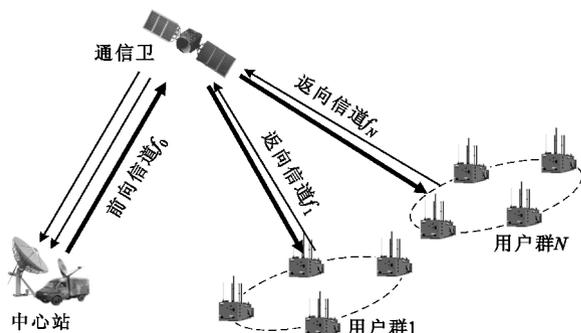


图 1 星状网络结构

Fig. 1 Structure of star network

#### (1) 前向信道

由中心站独享,用于中心站向所有用户广播入网应答、网络状态等网络管理类信息以及控制指令等通信业务类信息。与抗干扰传输波形相结合,在直接序列扩频传输方式下,前向广播信道为一一路扩频码;在跳频传输方式下,前向广播信道为一一路跳频信道。

#### (2) 返回信道

在直扩模式下,返回信道采用 FDMA+CDMA 的混合多址接入方式,不同用户群使用不同频率信道,

同一用户群的各用户使用相同频率信道但不同的扩频码;在跳频模式下,各用户需与卫星转发器保持跳频同步,借助已有的时间同步功能,返回信道采用 FDMA+TDMA 的多址方式,不同用户群使用不同的跳频信道,同一用户群的各用户使用同一跳频信道但不同的发送时隙。

### 3.2.4 工作原理

中心站查看本地消息发送缓冲区,结合消息数量和优先级,选择一个或多个用户,将各用户消息打包组帧,并在  $f_1$  频率上广播发送至卫星。每帧数据之间发送时无需等待,以 TDM 方式连续广播。

为提高通信业务传输实时性,各用户将发往中心站的消息打包组帧,在本用户群的发送频率( $f_2 \sim f_N$ )上,使用系统分配的扩频码连续发送至卫星或在本用户群的跳频信道上,使用系统分配的时隙发送至卫星,不用等到中心站的“点名”后才回传信息。

## 4 主要性能指标分析

### 4.1 用户容量

根据第 3.2.3 节的网络结构可知:直扩模式下的用户容量受限于返回链路的信道数量和同一信道中能容纳的多址用户数量;跳频模式下的用户容量受限于返回链路中的跳频载波数量和同一载波中的发送时隙。

#### 4.1.1 直扩模式

直扩模式下同一信道中能容纳的多址用户数量主要受多址干扰的限制。当同一用户群的多个用户同时与中心站通信时,每个用户的通信信号都受到其他所有用户的干扰<sup>[1]</sup>。

当多址干扰信号(含接收机热噪声)进入接收机后,扩频系统接收信号比特能量-干扰噪声单边功率谱密度比值为(假设到达接收机的各用户功率相等)

$$\frac{E_b}{n_j + n_0} = \frac{WP_s}{R_b[(N-1)P_s + Wn_0]} = \frac{G_p}{(N-1) + \frac{G_p}{E_b/n_0}} \quad (1)$$

式中,  $E_b$  为比特能量,  $n_j$  为多址干扰信号单边功率谱密度;  $n_0$  为接收机热噪声单边功率谱密度,  $W$  为扩频带宽,  $P_s$  为中心站接收到的单用户功率,  $R_b$  为信息速率,  $N$  为多址数量,  $G_p = W/R_b$  为扩频处理增益,  $E_b/n_0$  表示未受多址干扰时接收机解扩后的信噪比,  $E_b/(n_j + n_0)$  表示系统正常工作的接收门限信噪比,即解调门限。

改写式(1),得多址数量为

$$N = \frac{G_p}{E_b/(n_j+n_0)} - \frac{G_p}{E_b/n_0} + 1 \quad (2)$$

假设扩频信号带宽为7 MHz,用户等效输出功率  $EIRP = 37$  dBW,卫星饱和通量密度取  $-90$  dBW/m<sup>2</sup>,卫星饱和  $EIRP = 56$  dBW,中心站接收  $G/T = 35$  dB/K,信息速率  $R_b = 9.6$  kb/s,解调门限为6 dB,经计算,卫星-中心站链路实际  $EIRP = 21$  dBW,中心站未受干扰时接收机解扩后的信噪比  $[E_b/n_0] = 15$  dB,扩频处理增益  $[G_p] = [W/R_b] = 28.6$  dB,多址数量  $N = 160$ 。考虑到各用户在功率控制方面存在误差,到达中心站的各用户信号功率存在差异,一个用户群(即7 MHz带宽)可容纳约120个用户。

假设一路卫星转发器带宽36 MHz,扣除频率保护间隔,最多能设置4个7 MHz信道。除去中心站占用的1路信道,剩下3路总共能容纳约360个用户。

#### 4.1.2 跳频模式

参考已有卫星水平及未来发展趋势,每路转发器设置的跳频信道数量为20~60(受转发器带宽限制,传输速率越高信道数量越少)。根据传输速率不同,每路信道划分为2~20个时隙(传输速率越高可划分时隙越多)。每路转发器能容纳120~400个用户。

### 4.2 抗干扰性能

不考虑对上行链路(中心站-卫星)以及卫星转发器实施干扰(这两种情况实施难度较大),仅讨论下行链路(卫星-用户)的抗干扰性能。

#### 4.2.1 直扩模式

直扩模式下,干扰方能够实施的干扰方式有单频干扰、窄带干扰和宽带干扰。在干扰信号功率相同且干扰信号中心频率与通信信号重合的条件下,单频干扰信号的干扰效果最好。下面以单频干扰信号为例,分析直扩系统的抗干扰性能。

考虑接收机热噪声在内,系统的干扰容限为<sup>[4]</sup>

$$\frac{P_j}{P_s} = \frac{G_p}{E_b/(n_j+n_0)} - \frac{G_p}{E_b/n_0} \quad (3)$$

式中,  $P_j$  为干扰信号功率,其余变量的意义同式(1)。

假设扩频信号带宽约7 MHz,中心站天线口径6.2 m,发射功率2 W,卫星饱和通量密度取  $-90$  dBW/m<sup>2</sup>,卫星饱和  $EIRP = 56$  dBW,用户接收  $G/T = 3$  dB/K,信息速率  $R_b = 9.6$  kb/s,解调门限为6 dB,经计算,卫星-用户链路实际  $EIRP = 38$  dBW,用

户未受干扰时接收机解扩后的信噪比  $[E_b/n_0] = 15$  dB,扩频处理增益  $[G_p] = [W/R_b] = 28.6$  dB,系统干扰容限  $[P_j/P_s] = 21.6$  dB。加上卫通天线对干扰信号的空间抑制(毫米波天线波束窄,干扰信号一般从天线其他旁瓣进入,平均抑制不小于20 dB),考虑解扩损失2 dB,下行链路总的干扰容限不小于39.6 dB。

当下行链路实际  $EIRP = 38$  dBW时,到达接收天线阵面的通信信号功率  $P_s = -176$  dBW。要对链路造成有效干扰,要求到达天线阵面的干扰信号功率  $P_j \geq -137.4$  dBW。假设干扰机距离用户100 km,需要干扰机发射  $EIRP \geq 21.5$  dBW(等效输出功率140 W)。与抗干扰能力较弱的常规FDMA组网应用相比,所提方案增大了敌方实施干扰的难度。

#### 4.2.2 跳频模式

针对跳频模式,干扰方能够实施的干扰方式有阻塞干扰和跟踪干扰两种。

##### (1) 阻塞干扰

假设卫星-用户链路卫星发射  $EIRP = 48$  dBW,瞬时信号带宽256 kHz,经计算:到达用户天线阵面的通信信号功率  $P_s = -166$  dBW。假设跳频模式下用户终端解调门限为  $P_j/P_s = 8$  dB,接收天线对干扰信号空间抑制不小于20 dB,要对通信信号实施有效干扰,要求到达用户天线阵面的干扰信号功率  $P_j \geq -154$  dBW(瞬时信号带宽256 kHz)。假设卫星-用户链路跳频带宽1 GHz,干扰机距离用户100 km,由于跳频系统能够承受的最大干扰带宽为总带宽的30%,因此如果要实施有效干扰,则要求干扰机在300 MHz的带宽范围内输出  $EIRP \geq 32$  dBW(等效输出功率约1 600 W),实施干扰难度较大。

##### (2) 跟踪干扰

跟踪干扰包括波形跟踪干扰、引导跟踪干扰和转发跟踪干扰。其中,波形跟踪干扰以快速破译跳频图案为前提,由于跳频图案重复周期长,算法复杂,实施波形干扰不易实现。下面以引导跟踪干扰和转发跟踪干扰为例,分析跳频模式的抗干扰性能。

引导跟踪干扰和转发跟踪干扰的基本原理是只要出现一个跳频通信频率,立即引导干扰机在该频率上实施干扰或不经处理直接转发出去,从而对当前跳的通信频率形成干扰。这两种干扰方式存在着干扰跳速与通信跳速、干扰信号功率与通信信号功率、干扰机带宽与跳频通信带宽等多种约束因素,并遵守干扰椭圆原理<sup>[5]</sup>。

假设卫星-用户链路跳频速率10 000 hop/s,每跳驻留时间0.1 ms,假设干扰机与用户同时接收到

通信信号,干扰机对通信信号的处理时延为0.02 ms,要对通信信号实施有效干扰,那么干扰信号到达用户的传输时延不能超过0.08 ms,即干扰机距离用户的距离不能超过24 km,这对干扰方提出了较高要求。

## 5 结束语

在卫星通信组网方案设计中,用户容量和抗干扰性能可以较好兼顾,本文提出的组网方案可满足大容量用户在复杂电磁环境下的使用需求。在实际工程方案设计中,可根据本文提出的思路,对实际用户数量、卫星转发器性能参数、链路抗干扰能力需求等因素具体分析,折衷考虑,设计出满足系统应用的最佳方案。

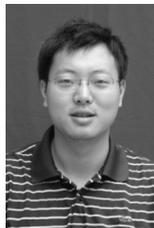
本文的理论计算是在假定通信速率的前提下进行的,在进行相关计算时也没考虑大气损耗和雨衰对毫米波频段的影响。在实际工程项目中,应充分考虑不同业务类型对传输速率的需求,以及无线链路中各种因素影响,对实际系统的用户容量和抗干扰能力作出科学评估。

## 参考文献:

- [1] 曾兴雯. 扩展频谱通信及其多址技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2004.  
ZENG Xing-wen. Spread Spectrum Communication and Multiple Access Technology[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2014. (in Chinese)

- [2] 汪春霆. 卫星通信系统[M]. 北京:国防工业出版社,2012.  
WANG Chun-ting. Satellite Communication System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [3] 夏晓巍. 适用于高动态平台的TDM/FDMA+令牌环卫星混合多址接入协议[J]. 电讯技术, 2013, 53(10): 1343-1346.  
XIA Xiao-wei. A TDM/FDMA+Token Ring Hybrid Satellite Multiple Access Protocol for High Dynamic Platforms[J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(10): 1343-1346. (in Chinese)
- [4] 黄爱军. 飞行器卫星通信链路设计与分析[J]. 电讯技术, 2012, 52(2): 125-129.  
HUANG Ai-jun. Design and Analysis of Satellite Communication Link Onboard Vehicle[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(2): 125-129. (in Chinese)
- [5] 姚富强. 通信抗干扰工程与实践[M]. 北京:电子工业出版社,2008.  
YAO Fu-qiang. Communication Anti-jamming Engineering and Practice[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)

## 作者简介:



罗华(1981—),男,四川达州人,2007年毕业于电子科技大学获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为卫星通信。

LUO Hua was born in Dazhou, Sichuan Province, in 1981. He received the M. S. degree from University of Electronics Science and Technology of China in 2007. He is now an engineer. His research concerns satellite communication.

Email: luohua7940@sina.com