

文章编号:1001-893X(2012)05-0649-05

某 Ku 频段卫星通信系统的设计^{*}

李几超

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:为了让两个地面站通过卫星链路进行无线通信,设计了一个 Ku 频段卫星通信系统,数据速率是 512 kbit/s ~ 4.096 Mbit/s,速率可调步进 1 bit/s。选取了一种较简洁的 Ku 频段地面站设计方案,信道的本振为固定点频,调制解调器的中频范围是 950 ~ 1 450 MHz。对卫星通信链路功率进行了预算。地面站的组成设备,如调制解调器、低噪声放大器、上变频单元、下变频单元等均选用成熟的商用货架产品,降低了设计风险和成本。本系统研制周期短,通信稳定可靠,得到了用户的认可。

关键词:卫星通信;链路功率预算;低噪声放大器;上变频单元;下变频单元

中图分类号:TN927 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.05.009

Design of a Ku Band Satellite Communications System

LI Ji-chao

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

Abstract: To realize communication between two ground stations via satellite wireless link, a Ku band satellite communications system is designed. The data rate range is 512 kbit/s ~ 4.096 Mbit/s in 1 bit/s step. A relatively simple design is selected for the ground station. The local oscillator(LO) of channel has a fixed frequency synthesizer. The intermediate frequency(IF) range of modem is 950 ~ 1 450 MHz. Satellite link power is budgeted. The ground station is composed of modem, low noise amplifier(LNA), block up converters(BUCs), block down converters(BDCs), which are off-the-shelf products so that the design risk and cost is reduced. The communication system is featured by short development cycle, stable and reliable communication. It has been authorized by users.

Key words: satellite communications; link power budget; low noise amplifier(LNA); block up converters(BUC); block down converters(BDC)

1 引 言

根据用户需求,相隔千里、均处于沙漠地带的两个工作单位要进行无线通信,用户要求通信的数据速率范围是 512 kbit/s ~ 4.096 Mbit/s,速率可调步进为 1 bit/s。

卫星通信(简称卫通)具有频带宽、容量大、性能稳定、成本与通信距离无关等优点,成为现代通信的

一种重要方式。超短波通信距离在 300 km 左右,而卫星通信距离可在 2 000 km 以上,短波通信距离远但传输速率低,因此远距离宽带无线通信建议选用卫星通信方式。卫星通信的工作频段很多,有 UHF、S、C、Ku 和 Ka 等频段。目前,国内的主流卫通频段还是 Ku 频段,同时在 Ku 频段的工程设计经验丰富。根据用户单位的地理位置及物质条件,我们为用户量身定制了一个 Ku 频段卫星通信系统。

^{*} 收稿日期:2011-09-30;修回日期:2012-05-07

2 卫星通信系统的组成

一个基本的卫星通信系统组成示意图如图 1 所示,该系统至少包含两个卫通站(可以是地面固定站,也可以是移动站)和必要的卫星资源。

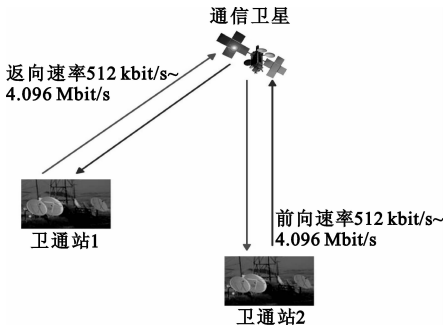


图 1 某卫星通信系统组成示意图

Fig.1 Composition diagram of a satellite communications system

在卫星通信中,Ku 频段常用的发射频率范围是 14.0 ~ 14.5 GHz,带宽为 500 MHz;接收频率范围是 12.25 ~ 12.75 GHz,带宽为 500 MHz。

一个卫通站主要包括卫通天线、信道设备、调制解调器、信息收发设备,卫通站组成框图见图 2。对于信道设备,上变频器和功放单元划分为一个整体,称为上变频单元(BUC),下变频器称为下变频单元(BDC),频率合成器隐含在上变频器、下变频器中,这里不单独列出。

图 2 所示为卫通地面站的组成原理框图,按照调制解调器的收中频、发中频频率是否固定可将卫通站组成细分为两种,如图 3 和图 4 所示。

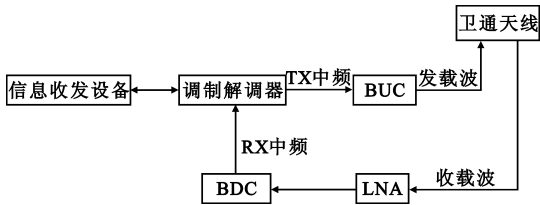


图 2 某卫通站组成原理框图

Fig.2 Composition diagram of a satellite communications station

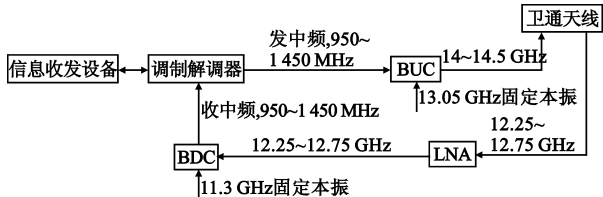


图 3 本振固定的卫通站组成原理框图

Fig.3 A satellite communications station with fixed frequency synthesizer

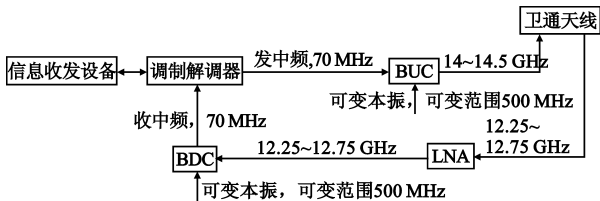


图 4 本振可变的卫通站组成原理框图

Fig.4 A satellite communications station with alterable frequency synthesizer

对比图 3 和图 4,由于收发中频固定的调制解调器和收发中频可变的调制解调器都是货架产品,在民用市场上可选的种类很多,且解调性能、价格基本一致;如果选择中频可变的调制解调器,则信道设备的本振频率是固定的,信道设备的设计相对比较简单,系统总体也不需要加载控制信道设备的频率。总之,本振固定、中频可变的卫通站的设计方案相对比较简练,适合工程实际应用,本文将对图 3 所述的卫通站进行设计分析。

2.1 卫星资源的选择

在系统应用中,选择“中卫一号”卫星。“中卫一号”卫星有 Ku 频段转发器 20 个,预计在轨寿命 15 年以上。该卫星采用洛克希德·马丁公司推出的面向 21 世纪商业通信卫星平台,具有模块化设计、可靠性高、智能程度高、轨道测控操作简便灵活、功率大、接收灵敏度高、可支持多种通信业务等特点。“中卫一号”通信卫星可覆盖中国本土和南亚、西亚、东亚、中亚及东南亚地区,波束覆盖如图 5 所示。

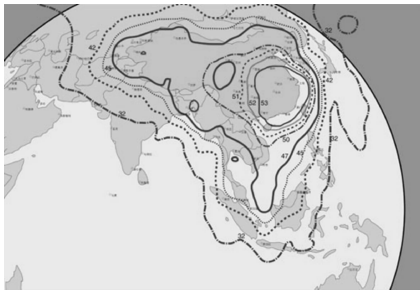


图 5 Ku 频段卫星 EIRP 覆盖图

Fig.5 The chart of a Ku band satellite equivalent isotropic radiated power (EIRP)

“中卫一号”卫星主要任务是保证国内邮电公用网通信、各大公司 VSAT 专网通信和广播电视服务,以及解决边远地区的通信问题,并可为周边国家提供通信服务。

2.2 地面站卫通天线

对于一个卫通系统,地面站卫通天线的选取应

考虑以下因素:价格预算、安装要素、电性能。综合考虑后确定卫通天线基本技术性能如下:

- (1)天线形式:2.4 m 抛物面天线;
- (2)发射频率:14.0 ~ 14.5 GHz;
- (3)接收频率:12.25 ~ 12.75 GHz;

- (4)发射增益:大于等于 48.5 dBi;
- (5)接收增益:大于等于 47.5 dBi;
- (6)地面站卫通天线 G/T 值:25.3 dB/K。

天线系统组成如图 6 所示。

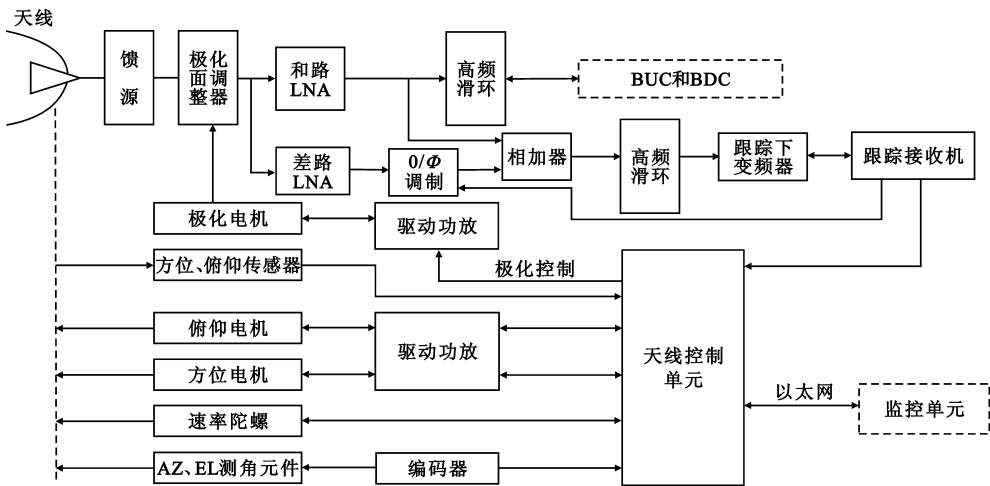


图 6 天线组成图
Fig.6 Composition diagram of the antenna

卫星通信天线可划分为射频分机、伺服分机、结构分机和跟踪接收机。射频分机主要由天线主反射面、副反射面、馈源、馈线、极化面调整装置、旋转关节等组成,卫星发射的电波经过天线主副反射面的两次反射后,经馈源、馈线、旋转关节通道把信号传送给跟踪接收机。跟踪接收机包括差 LNA、跟踪下变频器和跟踪接收机等。差路 LNA 安装在天线座上,跟踪下变频器把 Ku 频段跟踪信号变频到 L 频段;跟踪接收机的体制是单脉冲自跟踪,解调出的误差电压对应天线对准卫星的偏差,把误差电压送到伺服分机,从而跟踪卫星。伺服分机包括天线控制单元(ACU)、天线驱动单元(ADU)、电机、角位置传感器、角速率陀螺等,伺服分机用来控制天线实时指向卫星,确保信道畅通。天线结构分机主要由天线反射器、天线座、高低频滑环、传动和安全保护装置等组成,主要任务是完成天线座上的方位轴和俯仰轴的精密转动。

2.3 调制解调器

目前,在民用市场上,卫星通信专用的调制解调器种类多、价格适中、性能优良,有收发中频固定的调制解调器,也有收发中频可变的调制解调器,这里只列出图 3 表述的调制解调器的基本技术性能:

- (1)发中频频率范围:能覆盖 950 ~ 1 450 MHz;
- (2)收中频频率范围:能覆盖 950 ~ 1 450 MHz;
- (3)发中频电平范围: - 40 ~ 0 dBm;
- (4)收中频电平范围: - 80 ~ - 40 dBm;
- (5)发送数据速率:512 kbit/s ~ 4.096 Mbit/s,连续可变;
- (6)接收数据速率:512 kbit/s ~ 4.096 Mbit/s,连续可变;
- (7)调制解调方式:BPSK、QPSK、8PSK 可选;
- (8)编码方式:Turbo 码;
- (9)解调门限: $E_b/N_0 \leq 4$ dB (对应误码率小于等于 1×10^{-6})。

调制解调器的组成如图 7 所示。

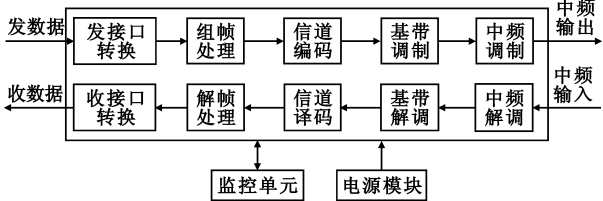


图 7 调制解调器组成图
Fig.7 Composition diagram of the modem

发送数据经过电平转换、组帧处理后再进行信道编码,完成加扰码、差分编码、FEC 前向纠错编码,

再经滤波处理、PSK 调制后,以发中频的形式进入卫通链路的射频信道;收中频信号经 PSK 解调后产生基带数据,之后进行信道译码,完成 FEC 译码、差分解码、去扰码,处理后的数据再经过解帧处理、接口电平转换后送用户。

调制解调器编码方式采用 Turbo 码,调制解调方式有 BPSK、QPSK、8PSK 供用户选择,当调制解调参数采用 Turbo 编码、编码率为 3/4、QPSK 调制时,解调门限 $E_b/N_0 \leq 4$ dB,对应的误比特率小于等于 1×10^{-6} 。

2.4 对信道设备的说明

信道设备包含低噪声放大器(LNA)、下变频单元(BDC)、上变频单元(BUC),通常 BUC 包含功率放大器。可以先对信道设备的技术性能做初步的了解,待系统链路计算完成后再确定 LNA、BDC、BUC 的技术指标。常用的 Ku 频段低噪声放大器(LNA)工作频段是 12.25 ~ 12.75 GHz,增益在 40 ~ 60 dB 之间,噪声系数在 0.8 ~ 2 dB 之间。Ku 频段功率放大器输出功率常用的有 10 W、25 W、40 W、70 W 等,具体输出功率值可根据工程需要来确定。

3 系统链路计算

图 1 中的卫通站 1 和卫通站 2 设备配置和参数一致,如天线形式、天线尺寸、天线 G/T 值、信道设备、调制解调器等要素完全相同,因此前向链路(卫通站 1→卫星→卫通站 2 链路)与返向链路(卫通站 2→卫星→卫通站 1 链路)完全对称,我们分析其中一条链路即可。

3.1 卫通站 1 至卫星链路

本文中用 $[x]$ 表示 x 的分贝值。有效全向辐射功率(EIRP)(单位为 dBW)计算公式为^[1]

$$[EIRP] = [P_{TE}] - [L_F] + [G_T] \quad (1)$$

式中, P_{TE} 代表信道功放的输出功率,20 W 的功放对应 $[P_{TE}]$ 为 13 dBW;取功放至天线的馈线损耗 $[L_F]$ 值为 1 dB;卫通站 1 的天线发射增益 $[G_T]$ 值为 48.5 dB;则卫通站 1 的有效全向辐射功率 $[EIRP] = 13 - 1 + 48.5 = 60.5$ dBW。

卫通链路接收信号载噪比(单位为 dBHz)计算公式为^[1]

$$[C/N_0] = [EIRP] + [G/T] - [L] + 228.6 \quad (2)$$

式中, $[EIRP]$ 已知;经查阅,“中卫一号”卫星的 $[G/T]$ 值为 5 dB/K;在不考虑雨衰的情况下,该链路传输损耗 $[L]$ 包含自由空间传播损耗、大气损耗、天线

极化损耗等,取值为 208.27 dB;则卫通站 1 至卫星链路的接收信号载噪比(单位为 dBHz)为

$$[C/N_0] = 60.5 + 5 - 208.27 + 228.6 = 85.83 \quad (3)$$

3.2 卫星至卫通站 2 链路

按照公式(2)可计算卫星至卫通站 2 链路接收信号的载噪比。“中卫一号”卫星转发器饱和 EIRP 值在 50 ~ 54 dBW 之间,但卫通站 1 的发射信号无法将卫星转发器推至饱和,经工程评估后取卫星 $[EIRP]$ 值为 38 dBW;卫通站 2 的天线接收 $[G/T]$ 值为 25.3 dB/K;该链路传输损耗 $[L]$ 包含自由空间传播损耗、大气损耗、天线极化损耗等,取值为 208.16 dB;则卫星至卫通站 2 链路的接收信号载噪比为

$$[C/N_0] = 38 + 25.3 - 208.16 + 228.6 = 83.74 \quad (4)$$

式(3)和式(4)的载噪比值可用公式(5)来综合,公式(5)表述为^[2]

$$N_0/C = (N_0/C)_1 + (N_0/C)_2 \quad (5)$$

根据公式(5)计算出前向链路(卫通站 1→卫星→卫通站 2 链路)总的接收信号载噪比为 81.6 dBHz。

接收信号载噪比的另外一种等值计算公式为^[1]

$$[C/N_0] = [E_b/N_0] + [R_b] \quad (6)$$

本卫星通信系统最高传输速率为 4.096 Mbit/s,则按理论分析,卫通站 2 接收信号的 E_b/N_0 值(单位 dB)为

$$[E_b/N_0] = [C/N_0] - [R_b] = 81.6 - 10 \lg 4096000 = 15.5 \quad (7)$$

卫通站 2 调制解调器解调门限为 4 dB,在不考虑雨衰的情况下,链路余量为 11.5 dB,当卫通链路传输速率低于 4.096 Mbit/s 时,系统链路余量更大,此时可以把卫通站 1 的功放输出功率适当调小。

4 信道设备的指标确认及系统无线对星试验情况

通过本文第 3 节的计算验证可知:信道设备 BUC 的功放功率定在 20 W 比较合适;在卫通站 1 实际输出功率小于等于 20 W 的前提下,卫通站 2 接收信号电平(从低噪声放大器 LNA 输入端口处观测)小于等于 -92.66 dBm(-92.66 dBm 是由卫星转发器实际 EIRP 值加上卫通站 2 的天线接收增益,减去链路传输损耗得出的)。

4.1 对低噪声放大器技术性能的确认

考虑到卫通站 2 的接收信号电平(从 LNA 输入

端口处观测)小于等于 -92.66 dBm ,而调制解调器的接收中频电平范围是 $-80\sim-40\text{ dBm}$,则 LNA 的增益定在 40 dB 比较合适,故 LNA 基本技术性能如下:工作频率范围为 $12.25\sim12.75\text{ GHz}$;增益为 40 dB ;噪声系数为 1.058 dB 。

4.2 对下变频单元技术性能的确认

考虑到 LNA 输出信号电平小于等于 -52.66 dBm ,结合通用调制解调器的技术性能,比如调制解调器的接收中频输入电平范围是 $-80\sim-40\text{ dBm}$,则 BDC 基本技术性能确定如下:输入射频频率范围 $12.25\sim12.75\text{ GHz}$;输入射频电平范围 $-80\sim-40\text{ dBm}$;输出中频频率范围 $950\sim1\,450\text{ MHz}$;变频增益为 0 dB ;噪声系数小于等于 6 dB 。

4.3 对上变频单元技术性能的确认

本文第 3 节链路分析确定了功率放大器的线性输出功率 P_{-1} 为 20 W ,而调制解调器的发中频电平范围是 $-40\sim0\text{ dBm}$,设 -17 dBm 的中频信号能将 BUC 推至 P_{-1} 功率, 0 dBm 的中频信号能将 BUC 推至饱和且不烧毁(BUC 中具备限幅电路),则 BUC 基本技术性能确定如下:输入中频频率范围为 $950\sim1\,450\text{ MHz}$;变频增益为 60 dB (典型值);输出射频频率范围为 $14\sim14.5\text{ GHz}$;功放线性输出 P_{-1} 功率为 20 W 。

4.4 卫星通信系统无线对星试验的结果

本卫星通信系统经过了多次无线对星试验,卫星资源是租用“中卫一号”卫星转发器,通信效果良好。试验基本情况如表 1 所示。

表 1 卫星通信系统试验结果
Table 1 The experimental result of the satellite communications system

测试项目	测试结果	是否符合用户要求	备注
发射频段 /GHz	14.0 ~ 14.5	符合	
接收频段 /GHz	12.25 ~ 12.75	符合	
调制方式	BPSK、QPSK	符合	由我方推荐
数据速率	512 kbit/s ~ 4.096 Mbit/s	符合	用户严格考核项
编码方式	Turbo 码	符合	由我方推荐
卫星链路情况	地面站接收 $E_b/N_0 = 14.9\text{ dB}$	/	测试时数据速率为 4.096 Mbit/s ,链路设计值为 15.5 dB ,测试值与理论值相差 0.6 dB

5 结 论

本文对一个具体的 Ku 频段卫星通信系统进行了方案选取、设计、链路计算,依据理论计算分配了各组成设备的技术指标,构建了卫星通信系统并进行了验证。该卫星通信系统包含卫通天线、低噪声放大器、上变频单元、下变频单元、调制解调器,各设备指标分配合理可行,系统设计思路比较清晰;经过系统无线对星试验验证,本文中的链路设计数据与实测值吻合(误差小于 1 dB),具有一定的工程设计参考价值。还可从以下两个方面进一步研究:第一,本课题涉及的卫通站是地面固定站,卫通天线是抛物面天线,而相控阵天线在天线高度、重量等方面具有较大优势,值得卫通领域的工程技术人员去深入研究;第二,本课题使用的是 Turbo 码,在调制解调方面,在相同的外界条件下,LDPC 编码的解调门限比 Turbo 码的解调门限约低 1.2 dB ;此外,LDPC 编码也可作为一个专题加以研究。

参考文献:

[1] 蔡剑铭,吕海寰,甘仲民,等. 卫星通信系统[M]. 2 版. 北京:人民邮电出版社,1994.
CAI Jian - ming, LV Hai - huan, GAN Zhong - min, et al. Satellite communications system [M]. 2nd ed. Beijing: People's Posts & Telecom Press, 1994. (in Chinese)

[2] Roddy D. 卫星通信[M]. 3 版. 张更新,刘爱军,张杭,等,译. 北京:人民邮电出版社,2002.
Roddy D. Satellite communications[M]. 3rd ed. Translated by ZHANG Geng - xin, LIU Ai - jun, ZHANG Hang, et al. Beijing: People's Posts & Telecom Press, 2002. (in Chinese)

[3] 刘旭东. 卫星通信技术[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
LIU Xu - dong. Satellite communications technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. (in Chinese)

[4] Wavestream Corporation. 16W/25W/40W Ku - Band Matchbox BUC datasheet [EB/OL]. [2011 - 03 - 25]. <http://www.wavestream.com/pdf/datasheets/Ku - Band%2016W - 25W - 40W%20Matchbox%20BUC.pdf>.

[5] Pratt T, Bostian C, Allnutt J. Satellite Communications[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.

[6] Comtech EF Data Corporation. CDM625 Advanced Satellite Modem Installation and Operation Manual [EB/OL]. [2011 - 10 - 11]. http://www.comtechefdata.com/files/manuals/mn - modems - pdf/mn - cdm625_r11.pdf.

[7] Comtech EF Data Corporation. CDM700 High speed Satellite Modem Installation and Operation Manual [EB/OL]. [2008 - 12 - 12]. http://www.comtechefdata.com/files/manuals/mn - modems - pdf/MN - CDM700_r5.pdf.

作者简介:

李几超(1979—),男,湖北仙桃人,2002 年获工学学士学位,2009 年获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为卫星通信。
LI Ji - chao was born in Xiantao, Hubei Province, in 1979. He received the B.S. degree and the M.S. degree in 2002 and 2009, respectively. He is now an engineer. His research direction is satellite communications.
Email: ljchust@126.com