

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2017.12.006

引用格式:毛新颜,张志强.FAST 深空数据传输速率分析[J].电讯技术,2017,57(12):1383-1387.[MAO Xinyan,ZHANG Zhiqiang.Deep space data transmission rate analysis of five-hundred-meter aperture spherical telescope (FAST)[J].Telecommunication Engineering,2017,57(12):1383-1387.]

FAST 深空数据传输速率分析*

毛新颜**,张志强

(北京空间飞行器总体设计部,北京 100094)

摘要:500 m 口径反射面射电望远镜(FAST)是目前世界口径最大、最灵敏的射电天文望远镜。为了分析 FAST 对深空探测任务的数据传输支持能力,利用数据传输链路预算分析方法,在规定特定工程余量的条件下,详细计算了 FAST 应用在内行星、外行星及柯伊伯带(Kuiper belt)天体探测任务中的数据传输速率。计算结果表明,FAST 等效成口径300 m的地面接收天线,能使目前的深空通信数据下行传输速率提高 70~400 倍,未来其将会强有力地支持我国的火星、木星等深空探测任务。
关键词:500 m 口径反射面射电望远镜(FAST);数据传输速率;链路分析;深空探测
中图分类号:TN927 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2017)12-1383-05

Deep Space Data Transmission Rate Analysis of Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope (FAST)

MAO Xinyan,ZHANG Zhiqiang

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract:Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope (FAST) is the largest and most sensitive radio astronomical telescope in the world. In order to analyze the data transmission support ability of FAST for deep space exploration mission, the data transmission link budget analysis method is adopted. In the provision of specific engineering allowance, the downlink transmission rate of FAST for inner planet, outer planet and Kuiper belt objects exploration mission is calculated. The result shows that, the telescope which is equivalent to a 300-metre aperture receiving antenna will increase the deep space downlink data transmission rate by 70~400 times. In the future it will strongly support China's Mars and Jupiter exploration mission.
Key words:five-hundred-meter aperture spherical telescope (FAST); data transmission rate; link analysis; deep space exploration

1 引言

2016 年 10 月,我国自主设计建设的500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope,FAST)落成启用,其具有极高的射电观测灵敏度,能够接收到 137 亿光年以外的电磁信号,观测范围可达宇宙边缘,被誉为“中国天眼”。该望远镜由主动反射面系统、馈源支持系统、

测量与控制系统、接收机与终端机观测基地等几大系统构成,具有三大主要特点:一是利用天然的适于射电望远镜建设的贵州喀斯特洼坑作为台址;二是利用主动变形反射面,在观测方向上形成 300 m 口径的抛物面汇聚电磁波,并在地面改正球差,实现宽带和全偏振观测;三是使用轻型索拖动馈源支撑系统和并联机器人,实现接收机的高精度定位及跟

* 收稿日期:2017-03-03;修回日期:2017-07-11 Received date:2017-03-03;Revised date:2017-07-11

** 通信作者:xymail01@163.com Corresponding author:xymail01@163.com

踪^[1]。作为世界上口径最大射电天文望远镜,FAST 的应用领域不局限于射电天文现象的观测,也可用作深空探测器的数据接收天线,应用于火星等深空探测任务的科学数据传输。

本文详细讨论了 FAST 在太阳系各类星体探测任务中的数据传输速率。根据各天体与地球的相对位置关系,利用链路预算分析表,得出下行数据传输码速率的变化范围,并将该数据与现今深空网的最大传输速率进行比较,通过比较得出了其对当今深空数据下行速率的提升幅度。

2 望远镜跟踪原理及主要技术指标

FAST 定位跟踪原理如下:在贵州喀斯特洼地内铺设口径为 500 m 的主动反射面球冠,其主动反射面分成多个小球面单元,由促动器控制,在观测方向形成 300 m 口径的瞬时抛物面^[2],见图 1;采用光机电一体化索支撑轻型馈源平台,加之馈源舱内的两次调整装置,在馈源与反射面之间无刚性连接的情况下,实现高精度的指向跟踪;馈源舱内则配置了多频段多波束的接收机系统用于接收射电无线信号。

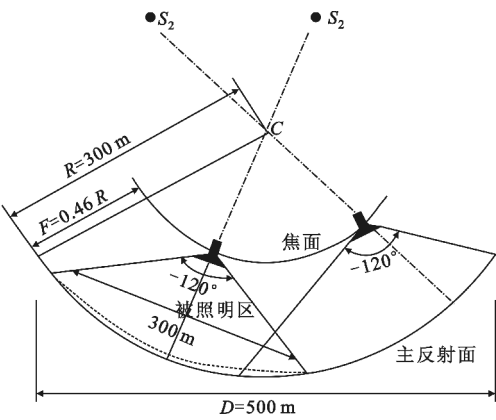


图 1 FAST 微波光学
Fig. 1 FAST microwave optics

FAST 射电望远镜的主要技术指标详见表 1。

表 1 FAST 主要技术指标

Tab. 1 Main specifications of FAST

参数		数值
主动反射面口径	半径/m	约 300
	口径/m	约 500
	球冠张角/(°)	110 ~ 120
有效照明口径/m		300
焦比		0.461 1
天空覆盖/(°)		天顶角 40
工作频率/MHz		70 ~ 3 000, 可扩展至 X 频段
指向精度/(")		8

作为一个低频地面设备,FAST 是独一无二的。我国西南的纬度使它处在全球深空网(Deep Space Net,DSN)一个有利位置,加之它的易变结构,有较大的升级改造空间^[3]。

3 数据传输速率的链路分析方法

对于航天器的科学数据传输通信而言,其最大传输速率可通过链路预算方式得出。通过指定的工程链路余量,计算最高数据传输速率。为最大限度地发掘 FAST 的数据接收能力,本文将链路余量规定为满足工程要求的 3 dB,此值已为数据传输链路的余量下限。

利用雷达公式计算地面站总的实际接收载噪谱密度比,进而得到实际接收信号的信噪比,将此值减去满足一定误码率所需的信噪比、指定的工程余量便得到了链路满足的最高码速率。

实际接收的载噪谱密度比计算公式如下:

$$\frac{C}{N} = \frac{\frac{P_t G_t / L_{tc}}{L_r} \cdot G_r \cdot \frac{1}{L_a}}{k T_s B_n} \tag{1}$$

式中:星上发射功率 P_t 乘以发射天线增益 G_t 并扣除馈线损耗 L_{tc} 得到航天器的发射有效全向辐射功率 E_t ,自由空间损耗为 L_r ,地面接收天线增益为 G_r ,大气吸收、极化、天线指向等损耗为 L_a , k 是波尔兹曼常数, T_s 是接收系统噪声温度, B_n 是噪声等效带宽。公式(1)中等号右侧的分子部分为实际接收的信号功率,等号右侧分母部分为接收匹配负载的噪声功率。

将公式(1)转化为对数形式为

$$\frac{C}{N} = E_t - L_r - L_a - k + \frac{G_r}{T_s} - B_n \tag{2}$$

由此得到最大传输速率计算公式如下:

$$R_{max} = \frac{C}{N} - L_s - \frac{E_b}{N_0} + G_m - M \tag{3}$$

式中: L_s 为地面的调制、解调及非线性损耗, E_b/N_0 为满足一定误码率条件下解调所需的码元信噪比, G_m 为信道编码增益, M 为设定的最低链路余量。通过公式(3)可以计算出特定信道条件下的最大传输码速率。

4 深空探测任务的数传链路预算

建立深空航天器与地球的数据传输链路与目前我们所熟悉的中低轨道航天器数据传输链路有很大

的不同,主要表现在巨大的时延及路径损失,因此要同时对航天器的发射系统及地面接收系统进行特殊的设计。按照航天器数据传输系统配置的不同,将数据传输链路分析分为两大类:第一种为除地球外的内行星探测,主要探测目标为水星、金星及火星,由于这些行星距离太阳较近,可以配置太阳能帆板,因此发射功率可以较大;第二种为外行星探测,主要目标为木星、土星、天王星、海王星及包括冥王星在内的柯伊伯带(Kuiper belt)天体,这些天体距离太阳较远,航天器无法配置太阳能帆板,仅能采用输出功率较小的同位素热电源(RTG),因此发射功率较小。两类不同的探测任务导致了数据传输速率的较大差别。

4.1 内行星探测任务

内行星探测任务中,航天器可配置输出功率较大的 X 频段行波管放大器,其最大输出功率可达 100 W,配置 3.5 m 发射天线,其增益为 42 dBi,发射机与天线近端配置后馈线损耗 L_{lc} 约为 1 dB,由此计算出航天器的有效全向辐射功率 E_t 为 61 dBW。以火星探测为例,其距地球最近距离约为 59.6×10^7 km,距地球最远距离约为 4.013×10^8 km,计算出自由空间损耗的变化范围为 266.43 ~ 282.99 dB。

FAST 作为地面接收天线,其有效口径 $D = 300$ m,该主动反射面由 2 000 多个对角径为 15 m 的球形单元面板组成,最高工作频率可达 X 频段,反射效率可按 Ruze 公式估计,最高效率 η 为 16.6%^[4],则地面天线的接收增益可按以下公式计算:

$$G_r = 20\lg D + 20\lg \eta + 20\lg \left(\frac{\pi}{300}\right) + 10\lg f. \quad (4)$$

式中: f 为载波频率,取 8 400 MHz。由此计算出地面天线的增益为 80.63 dBi。对于地面接收系统的噪声温度,可由下式计算得出^[5]:

$$T_s = 10\lg(T_A + (L_{line} - 1)T_0 + L_{line}T_R). \quad (5)$$

式中: T_A 为天线噪声温度; T_0 为环境温度,这里取常温 290 K; L_{line} 为地面的馈线损耗,取 0.25 dB; T_R 为接收机的等效噪声温度,采用噪声极低的受激辐射微波放大器,并将该低噪声放大器随同馈电系统浸入液氮中,这样就可使接收系统的噪声温度降至 6.5 K^[6]。 T_A 主要受环境因素影响,为了减少对射电天文观测的电磁干扰,贵州省政府于 2013 年出台法令,在 FAST 周围设立了一个半径为 5 km 的无线电静默区,30 km 内不允许有干扰设施,因此天线噪声温度可低至 10 K。由此计算出的地面接收系统噪声温度 T_s 为 15.32 dBK,进而得到地面接收系统的

G/T 值为 65.06 dB/K。

一般情况下,若使地面接收的数据可用,误码率要求不高于 1×10^{-6} ,图 2 给出了 QPSK 相干解调的误码率曲线。根据该曲线可以得到,在误码率为 1×10^{-6} 指标下,要求进入接收系统的码元信噪比 E_b/N_0 理论值为 10.6 dB。信道编码采用增益较高的 LDPC 编码,最大的编码增益 G_m 可达 7 dB。

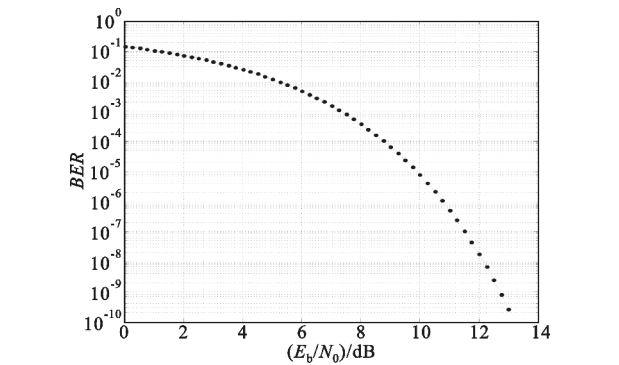


图 2 QPSK 相干解调误码率曲线
Fig. 2 BER of QPSK coherent demodulation

综合以上参数,对火星探测任务的数据传输速率计算结果如表 2 ~ 3 所示。

表 2 火星探测任务数传码速率分析(最近距离)
Tab. 2 Data transmission rate of Mars mission (nearest distance)

物理量及其定义	数值
传输距离/km	5.96×10^7
发射载波频率/MHz	8 400
天线端口固放输出功率/dBW	20
天线增益/dBi	42
航天器馈线损耗/dB	1
发射有效全向辐射功率/dBW	61
空间衰减/dB	266.43
指向、极化损耗/dB	0.5
大气损耗和雨衰/dB	0.5
玻耳兹曼常数/(dBW · (Hz · K) ⁻¹)	-228.6
地面站接收 G/T 值/(dB · K ⁻¹)	65.06
解调和调制、非线性损耗/dB	1
编码增益/dB	7
实际所需 E_b/N_0 /dB	3.6×10^{-6}
接收的载噪谱密度比/dBHz	87.23
工程余量/dB	3
接收码速率/(Mbit · s ⁻¹)	91.75

表 3 火星探测任务数传码速率分析(最远距离)

Tab.3 Data transmission rate of Mars mission (furthest distance)

物理量及其定义	数值
传输距离/km	4.013×10^8
发射载波频率/MHz	8 400
天线端口固放输出功率/dBW	20
天线增益/dBi	42
航天器馈线损耗/dB	1
发射有效全向辐射功率/dBW	61
空间衰减/dB	282.99
指向、极化损耗/dB	0.5
大气损耗和雨衰/dB	0.5
玻耳兹曼常数/ $(\text{dBW}\cdot(\text{Hz}\cdot\text{K})^{-1})$	-228.6
地面站接收 G/T 值/ $(\text{dB}\cdot\text{K}^{-1})$	65.06
解调和调制、非线性损耗/dB	1
编码增益/dB	7
实际所需 E_b/N_0 /dB	3.6×10^{-6}
接收的载噪谱密度比/dBHz	70.66
工程余量/dB	3
接收码速率/ $(\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1})$	2.02

由表 2 和表 3 可以得出,在火星距离地球最近时,其数据传输码速率可达91.75 Mbit/s,在距离地球最远时(不考虑日凌影响,以下同),其最高传输码速率也可达到2.02 Mbit/s。对于金星及水星探测任务,其航天器设备方案基本相同,唯一区别仅为与地球的距离。表 4 给出了水星与金星的距离变化范围。

表 4 金星、水星与地球距离变化范围^[7]

Tab.4 Range of distance between Venus,Mercury and Earth^[7]

天体	最近距离/ 10^6 km	最远距离/ 10^6 km
金星	39.6	261.0
水星	101.1	221.9

利用本文的链路分析方法,可得出在距离地球最近时,金星探测任务的最大码速率为207.8 Mbit/s,水星探测任务最大码率速率为31.88 Mbit/s;在距离地球最远时,金星探测任务最大码速率为4.78 Mbit/s,水星探测任务最大码速率为6.61 Mbit/s。

4.2 外行星探测任务

由于外行星距离太阳较远,太阳能帆板的发电效率很低,所以该类深空探测任务的航天器通常配置同位素热电发生器,航天器上的功率极大受限,因此不能采用高功率行波管放大器。在迄今为止的外行星探测任务中,Galileo、Ulysses 及 Cassini^[8] 探测任务使用的 X 频段行放输出功率为 20 W,New Horizons 探测任务使用的 X 频段行放输出功率为 12 W,Juno^[9] 探测任务使用的行放输出功率最高,可达 25 W。因

此,在链路预算过程中,选择 20 W 发射功率。航天器其他的参数配置与内行星探测基本相同。

对于空间传输部分,由于外行星及冥王星距离更远,所以其空间衰减更大。各大天体与地球距离变化范围详见表 5。

表 5 外行星及冥王星距离变化范围^[9]

Tab.5 Distance range of outer planets and Pluto^[9]

天体	最近距离/ $(10^6$ km)	最远距离/ $(10^6$ km)
木星	593.7	968.0
土星	1 199.7	1 659.1
天王星	2 591.9	3 155.1
海王星	4 304.9	4 694.1
冥王星	4 297.9	7 535.1

对于木星及土星探测,地面接收系统 FAST 的参数参照内行星探测。对于天王星、海王星及冥王星探测,可采用 (k,r) 为 $(15,1/6)$ 卷积码和 R-S 码级联,编码增益 G_m 可进一步提高至10 dB。

表 6 外行星及冥王星数据传输速率

Tab.6 Data transmission rate of outer planet and Pluto

天体	最近距离码速率/ $(\text{kbit}\cdot\text{s}^{-1})$	最远距离码速率/ $(\text{kbit}\cdot\text{s}^{-1})$
木星	184	69.39
土星	45.17	23.62
天王星	19.31	13.03
海王星	6.88	5.89
冥王星	7.02	2.28

综合以上对内行星、外行星及柯伊伯带天体探测任务的分析,可以得出 FAST 的深空数据传输速率变化范围,如图 3 所示。

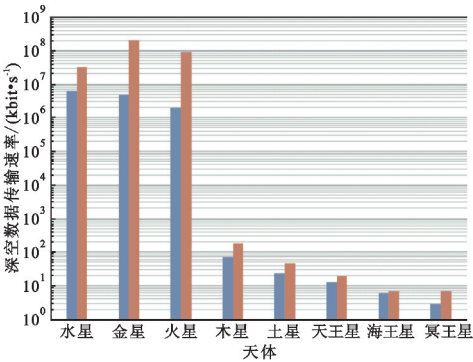


图 3 FAST 深空数据传输速率变化范围

Fig.3 Deep space transmission rate variation range of FAST

5 对现有深空网数据传输能力的提升

对于现有的深空网,其对数据传输能力支持能力较为有限,主要受制于较远的通信距离带来的较大自由空间损耗。内行星探测任务中,水星探测的

数据传输码速率约为180 kbit/s,金星探测的数据传输码速率约为270 kbit/s,火星探测码速率变化范围为 30 ~ 600 kbit/s。由第 4 节分析可知,FAST 在水星探测任务中的平均码速率约为19.2 Mbit/s,比现最高速率提高了 106 倍;在金星探测任务中的平均码速率约为106 Mbit/s,比现最高速率提高了 393 倍;火星探测任务中,在距离地球最近时传输码速率提高了 152 倍,距离地球最远时提高了 70 倍。

外行星探测任务中,任务期间普遍的数据传输速率变化范围为 6.358 ~ 2 000 bit/s。以 New Horizon 探测器为例,其在冥王星轨道处的数传速率为 20 bit/s,使用 FAST 可达到接近3 kbit/s,提高了约 150 倍;Juno 在木星轨道附近的数据传输速率约为 360 bit/s,使用 FAST 可达到近70 kbit/s,提高了约 190 倍。

由此可以看出,FAST 能够给深空探测任务数据传输码速率带来 70 ~ 400 倍的提升,极大地扩展了深空网的数据传输能力。

6 结束语

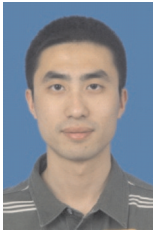
FAST 作为世界口径最大的射电天文望远镜,其在深空探测领域的应用潜力非常巨大。通过本文的分析可以看出,FAST 可以极大地提高深空探测器的数据下行传输码速率。随着本世纪太阳系行星探测特别是火星探测热潮的到来,FAST 在支撑数据传输速率扩展方面将会发挥不可替代的作用。若将此天线同时建造为深空数据接收站,可对全球深空网有很好的提升作用。以往探测任务中仅能传输工程数据及少量图片,应用 FAST 后高清视频及多媒体数据的传输将成为现实,人类对地外行星的了解将会更加深入。

参考文献:

[1] 李会贤,南仁东. FAST 工程进展及展望[J]. 自然杂志,2015(6):424-434.
LI Huixian,NAN Rendong. Progress and outlook of FAST [J]. Chinese Journal of Nature, 2015 (6): 424 - 434. (in Chinese)
[2] 彭勃,南仁东,朱文白,等. 500m 口径球面射电望远镜 (FAST)可行性报告[C]//2002 中国天文望远镜及仪器学术讨论会论文集. 北京:中国科学技术出版社,2003:55-63.
[3] 南仁东. 500m 球反射面射电望远镜 FAST[J]. 中国科学 G 辑 物理学 力学 天文学,2005,35(5):449-466.

NAN Rendong. Five-hundred-meter aperture spherical telescope FAST[J]. SCIENCE IN CHINA Ser. G Physics, Mechanics & Astronomy,2005,35(5):449-466. (in Chinese)
[4] 苏彦. FAST 在深空探测中的应用前景[J]. 天文学报, 2001,42(1):61-69.
SU Yan. The prospect of FAST in deep space exploration [J]. Acta Astronomica Sinica, 2001, 42 (1): 61 - 69. (in Chinese)
[5] 甘仲民. 卫星通信地球站收发射频设备技术性能指标浅释(三)——地球站接收设备性能指标浅释[J]. 数字通信世界,2015(3):1-7.
GAN Zhongmin. Introduction of technical performance specification for receiving-transmitting RF equipment of a satellite communication earth station (part 3) —introduction of technical performance specification for receiver of earth station [J]. Digital Communication World, 2015 (3):1-7. (in Chinese)
[6] 石书济. 深空探测与测控通信技术[J]. 电讯技术, 2001,41(2):1-4.
SHI Shuji. Deep space exploration and TT&C communication[J]. Telecommunication Engineering,2001,41(2): 1-4. (in Chinese)
[7] 张更新,谢智东,沈志强. 深空通信的现状与发展[J]. 数字通信世界,2010(4):82-86.
ZHANG Gengxin,XIE Zhidong,SHEN Zhiqiang. Current situation and development of deep space communication [J]. Digital Communication World, 2010 (4): 82 - 86. (in Chinese)
[8] TAYLOR J,SAKAMOTO L,WONG C J. Cassini orbiter/huygens probe telecommunications[EB/OL]. [2017-02-12]. <https://descanso.jpl.nasa.gov/DPSummary/Descanso3-Cassini.pdf>.
[9] MUKAI R,HANSEN D,MITTSKUS A,et al. Juno telecommunications [EB/OL]. [2017-02-12]. https://descanso.jpl.nasa.gov/DPSummary/Juno_DESCANSO_Post121106H-Compact.pdf.

作者简介:



毛新颜(1986—),男,辽宁阜新人,2010 年于英国帝国理工学院获通信与信号处理专业硕士学位,现为工程师,主要研究方向为卫星测控与数据通信系统;
Email:xyemail01@163.com

张志强(1978—),男,辽宁辽阳人,硕士,高级工程师,主要研究方向为卫星测控与数据通信系统、航天器总体设计。