

卫星内无线光网络通信技术及其实现*

蔡然¹ 薛蔡³ 曹捷² 傅劲¹ 胡渝¹

(1 电子科技大学, 成都 610054)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西西安 710068)

(3 中国工程物理研究院电子工程研究所, 绵阳 621900)

摘要 卫星内无线光网络通信的基础在于卫星内无线光通信链路. 为保障链路质量, 必须解决适合卫星内环境的抗噪和抗多径损害等技术问题, 以及相关设备的适当重量、体积和功耗等实现问题. 其关键是结合载波和卫星环境的特性, 并配合其它卫星技术研究无线光网络通信技术. 实验表明, 在卫星内实现适应编码调制和脉冲波形技术, 无线光噪声复合消除技术、后验均衡技术和有序捆绑解调解码技术等, 点对点和对多点高速光链路误码率达到了正常通信要求. 为进一步利用无线光属性组建高服务质量(QoS)网络, 获得高的整体通信效率奠定坚实基础.

关键词 卫星; 无线光网络通信; 编码调制; 脉冲波形

中图分类号 TN219 V443+.1 TN929.1 TN915.11 **文献标识码** A

0 引言

卫星通信的枢纽位置和所起到的巨大作用是其它任何通信手段都无法替代的. 有着特别重要的军事用途以及广阔的民用市场, 国防价值、经济价值和社会价值巨大. 下一代卫星通信系统采用无线光信息传输、获取、处理技术取代微波技术, 是当今世界高新技术发展的重要领域^[1-6].

无线光通信带宽远大于微波等射频系统, 不需要处理穿透性很强的电磁兼容问题. 其容量大、保密性强、安全性好、抗干扰性好、兼容性好, 支持移动通信. 信息传输和交换能够从物理上无泄漏地封闭在某域内部进行^[9-10], 是卫星通信的最佳手段. 当前各强国虽大力投入, 但主要着眼于卫星间无线光通信. 有关卫星内无线光通信技术及其实现未见公开报道.

卫星内无线光网络通信技术, 应用于卫星通信以及控制数据传输等, 有着其独特的优点. 其核心是卫星环境噪声抑制技术和卫星多径损害消除技术等及其工程实现, 从而使得码间干扰尽量小, 误码率尽量低^[7], 链路运行稳定可靠, 能够提交上层正确的码字.

为了更好地工程实现, 并进一步发展卫星内无线光通信技术. 必须从物理层到链路层, 直至网络层和更高层系统化对其展开研究, 探讨其构建, 分析其运行特征, 掌握获得高的整体通信效率和高 QoS

的相关技术. 同时高层技术又可为低层技术及其进一步发展提出合理的要求和方向^[5,8].

1 卫星内通信环境

卫星内无线光通信需信源编码调制后, 每个码元以一定的波形发送, 进入信道传输(可能还需若干交换、路由设备处理), 到达信宿, 由无线光通信收信设备接收探测, 解调解码后完成通信.

卫星内无线光通信传输路径多路并存, 这增加了通信的灵活性以及实用性. 当某一条传输路径被障碍物遮拦后, 其他的传输路径可使通信正常进行. 但同时, 多径效应也带给通信负面影响, 必须加以处理.

从卫星发射直至运行各阶段, 卫星内无线光通信系统所受各种作用力及其变化会干扰其稳定工作, 这些作用力还会激发出多种噪声. 同时, 卫星内空气环境是处在变化中的, 随着空气成分及其密度的不同, 卫星内温度的不同和温度变化的不同, 载波的传输特性会有所不同. 并且, 卫星内辐射也会因此而产生变化, 其与卫星内辐射源一道成为卫星内无线光通信近场背景辐射噪声; 而远场背景辐射噪声包括所有从卫星外进入卫星内的恒星星光等辐射, 但它以太阳光辐射为主. 此外, 电磁干扰等因素也会产生背景噪声. 为保证能够达到正常无线光通信所需技术指标, 必须消除背景噪声的影响, 以满足所需信噪比. 经工程匹配^[1], 实现发射功率技术、滤波器匹配线性编码技术, 编码调制和波形技术, 平方律探测器结合滤波及卫星基线恢复技术, 后验均衡技术和有序捆绑解调解码技术等可达目的.

*863 卫星项目后续项目子项目和自然科学基金(60272006)项目子项目

Tel: 028-83202411 Email: RanCai@sohu.com

收稿日期: 2004-02-20

2 适应编调

卫星内无线光通信发信设备框图如图 1.

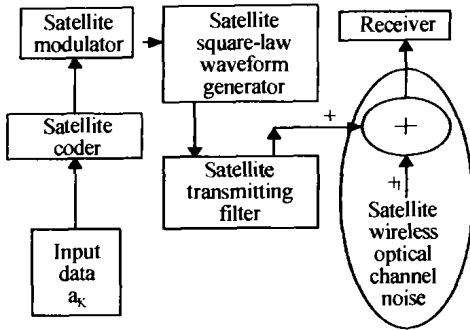


图 1 卫星内无线光通信发信部分框图
Fig. 1 The intra-satellite optical transmitting branch

为达正确传送信息的目的,卫星内无线光通信系统的误码率必须低于一定的上限.同时,发信所耗平均光功率和所需要的接收器带宽应适中.因此,需要适宜的编码调制和波形技术.

开关键控为适合卫星内无线光网络通信的二进制码型.编码一次取若干位比特映射到唯一与之对应的码元上.然后把编码器输出的二进制序列送进调制器.调制器把每个二进制数据映射为波形.归零开关键控带宽要求大于不归零开关键控,但较大地增强了抗噪能力,降低了正常通信对平均功率的要求,故而较好地折衷功率要求和带宽要求.其信噪比

$$SNR = \frac{2P_A^2 RT_C}{\beta n_0} \quad (1)$$

式(1)中 P_A 是平均发射光功率, R 为接收响应率, T_C 为码元间隔, n_0 为噪声功率谱密度, β 为星内恶化系数.

在完成前述编码后,经极性脉冲编码达到近零的不均衡性,可降低发射信号的直流分量.其对消除噪声的干扰和避免基线偏移非常有效;同时使信号的直流和低频成份也变得适中,定时信号的提取很方便.

3 发送波形

发送码元之波形采用平方律波.它的波形在初始以较大的斜率上升,具有较少的高频分量,在经卫星内无线光通信信道传送到收信机过程中,多径失真相对较少.

以 P_{max} 表示接收光峰值功率, σ^2 表示噪声方差, L 表示序列尾随脉冲的长度, $a_k \in \{0, 1\}$ 且是独立的,则

$$\alpha_k \equiv (\dots, a_{k-1}, a_{k+1}, \dots) \quad (2)$$

系统离散脉冲响应

$$h_k = h_0 \delta_k + (1 - \delta_k) h_k \quad (3)$$

波形间干扰

$$I_k = 2 \sum_{i \neq k} a_i h_{k-i} \quad (4)$$

以一定间距发送若干个平方律波,其相互间干扰相对较小,系统性能相对较好.

用这种波形传送码元,误码率

$$BER = \frac{1}{\rho 2^L} \sum_{\alpha} Q \left(\frac{P_{max} (1 - I_k)}{2\sigma} \right) \quad (5)$$

式(5)中, ρ 为星内波形系数, Q 函数为

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2/2} dy \quad (6)$$

标准的脉位调制 PPM 是另一适合本通信的码型,属于正交调制.比之开关键控,它所耗平均功率少些,但增加了对带宽和发射器的峰值功率的要求,并且同步较难.

4 复合消噪

卫星内无线光通信噪声主要集中在从直流到高频这一频段,本系统收信采用前置放大器的输出通过高通滤波器抑制.滤波后信号的基线偏移,采用卫星基线恢复法消除.卫星基线恢复系统框图如图 2.图中 r_{k-1} 为其延时输出信号, D_{k-1} 为最终数据输出,误差信号

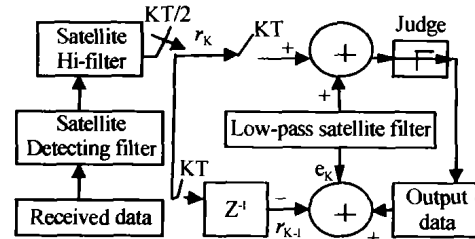


图 2 卫星基线恢复系统
Fig. 2 The satellite baseline restoration system

$$e_k = D_{k-1} - r_{k-1} \quad (7)$$

将 e_k 通过截止频率等于高通滤波器截止频率的一阶低通滤波器,以恢复信号的低频分量,然后与高通滤波器输出 r_k 相加.

对比实验结果表明,有基线偏移的接收波形的包络高低不平,必须加以处理;卫星基线恢复系统去除了基线偏移,其波形的包络比较平稳,并且判决门限增加了 0.5,对正确判决至关重要.同时,系统也因此而减少了功率损失.

5 后验均衡

由于卫星内无线光通信信道引起多径失真,并导致码间干扰,使系统的误码率很高,必须加以补偿.后验均衡技术利用已探测到的符号参数抑制码间干扰,其系统方框图如图 3.

系统预处理信号以 $T/50$ 为采样率, 以提供一个良好的近似连续时间信号. 同时, 让采样率为 $T/2$ 加性白高斯噪声通过一个单独设置的积分并转储滤

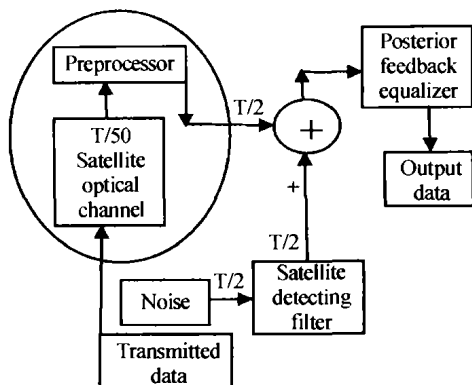


图3 后验均衡器系统
Fig. 3 The satellite posterior feedback equalizer system

波器, 其各项技术参数与预处理器中后探测滤波器完全相同. 尔后两路信号相加. 在后验均衡器中, $T/2$ 间隔前置滤波器以及 T 间隔的反向滤波器都是可调节的, 抽头系数由最小均方算法来确定. 在滤波器具有同样数目抽头的情况下, 采用分数间隔前置滤波器可以消除系统对定时误差的敏感性.

对关键控通信系统, 其输入是实数值. 均衡器信道脉冲响应

$$h(t) = s(t) * c(t) * r(t) \quad (8)$$

式(8)中 $s(t)$ 对应发射实值滤波, $c(t)$ 对应卫星内无线光通信信道, $r(t)$ 对应接收实值滤波. $H(t)$ 采样的交叠频谱

$$H_{eq}(e^{j\omega T}) = \frac{\mu}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} H\left(\omega + \frac{2\pi m}{T}\right) \quad (9)$$

式(9)中 μ 为修正系数. 平均功率损失

$$P_L = 5 \log_{10} \frac{1}{(1-\lambda)\bar{M}(\alpha)} \quad (10)$$

式(10)中 α 为

$$\alpha = \frac{|H_{eq}(e^{j\omega T})|^2}{R_{eq}^2(e^{j\omega T})} + \frac{N_0}{\sigma_A^2} \quad (11)$$

式(11)中

$$R_{eq}^2(e^{j\omega T}) = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left| R\left(\omega + \frac{2\pi m}{T}\right) \right|^2 \quad (12)$$

N_0 代表噪声功率谱密度, σ_A^2 是数据的方差值, λ 是卫星因子, \bar{M} 为 $\omega \in [0, 2\pi/T]$ 范围的几何平均. 均衡器在信号进行判断前将均方误差降到最低, 带给系统较大增益. 功率损失收敛于 SNR 的极限.

6 有序捆绑解调解码

卫星内无线光通信的收信解调解码技术匹配于发信编码调制技术, 其系统框图如图 4. 接收机采用平方律探测器探测信号, 并结合滤波及卫星基线恢

复技术处理背景噪声; 同时, 采用数字式处理技术实现后验均衡器自动适应信道脉冲响应的变化.

配合波形矢量判决技术、多址技术、定时恢复技术、DFE 的调节适应技术等, 有序捆绑处理使本系统实现了高速解调解码.

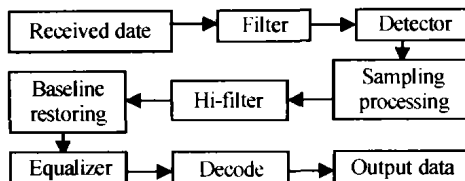


图4 卫星内无线光通信解调解码系统框图
Fig. 4 The block diagram of the intra-satellite wireless optical demodulating and decoding system

卫星内无线光通信设备重量轻、体积小、功耗低, 其可移动传输特性和卓越的链路抗损毁性能, 又给系统提供了高可靠性. 同时, 用无线光宽带复合布线代替有线, 海量传送智能控制信息, 可大大减化系统线路.

虽然卫星内无线光网络系统能够提供透明通信. 但要充分发挥其效能, 就必须利用卫星内无线光属性, 例如传输特性等组网通信, 建立物理无缝融合逻辑拓扑的内外安全机制、权限机制和独特的路由机制. 卫星内无线光网络可通过结口技术与卫星外无线光通信和有线通信互联, 为获得资源共享和传送控制等信息服务的高效、可靠、主动和灵活奠定基础. 为了组建高 QoS 网络, 获得理想的通信效率, 必须进一步研发相关协议及其支持设备.

卫星内无线光网络通信的另一个研究重点是本实验室首次提出并正展开进一步研究的 Prime/OOC 编码调制技术及其实现, Prime/OOC 以素数码作为时间扩频模式、以码重等于素数码码重的 OOC 作为频域跳频模式. 其不但可用于非相干光 CDMA^[2], 而且自相关性和互相关性更好、抗干扰性及保密性更强、容量更大. 其相应编码器等发信设备用无线布喇格光栅编调技术来实现. 图 5 示出我实验室研发的无线光网络通信系统部分装置.



图5 我室研发的无线光网络通信系统部分装置
Fig. 5 Some apparatus developed by our laboratory

7 结论

本实验室研发的卫星内无线光通信系统, 以 100 M/bps 在模拟卫星内无线光通信信道传输数据, 经测试, 系统误码率低于 10^{-6} , 基本达到组建通

信物理网络,并在此基础上配合高层技术运行的要求,为进一步开发奠定了根基.

参考文献

- 1 达争尚,陈良益. 光电系统的匹配设计. 光子学报,2003,32(6):669~671
Da Z S, Chen L Y. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(6):669~671
- 2 李传起,孙小菡,张明德,等. OCDMA 系统二维 RS 地址码的设计方案及性能分析. 光子学报,2004,33(2):187~191
Li C Q, Sun X H, Zhang M D, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(2):187~191
- 3 唐锋,井文才,张以谟,等. 信噪比对偏振耦合测试影响分析. 光子学报,2003,32(9):1056~1058
Tang F, Jing W C, Zhang Y M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(9):1056~1058
- 4 金韬. 基于电光效应的相干检测星间跟踪技术. 光子学报,2003,32(10):1185~1188
Jin T. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(10):1185~1188
- 5 Cai R, Hu Y, Xue C. Routing control mating with the topology get broadband wireless optical network high transfer efficiency. *Proc of SPIE*, 2003, 5282(2):978~987
- 6 Baister G, Gatenby P, Laurent B, et al. Applications for optical free space links in inter-satellite and intra-satellite communications. *Optical Free Space Communication Links, IEE Colloquium*, 1996, 19:9/1--9/6
- 7 Kavehrad M, Jivkova S. Indoor broadband optical wireless communications: optical subsystems designs and their impact on channel characteristics, *Wireless Communications, IEEE*, 2003, 10(2):30~35
- 8 Marchese M, Rossi M, Morabito G, et al. PETRA: Performance Enhancing Transport Architecture for Satellite Communications Selected Areas in Communications. *IEEE Journal*, 2004, 22(2):320~332
- 9 Carruthers K. Angle diversity for nondirected wireless infrared communications. *Communications, IEEE Transactions*, 2000, 48(6):960~969
- 10 Luftner T, Kropf C, Hagelauer R, et al. Wireless infrared communications with edge position modulation for mobile devices. *Wireless Communications, IEEE*, 2003, 10(2):15~21

Intra-satellite Wireless Optical Network Communication Technologies and Implementation

Cai Ran¹, Xue Cai³, Cao Jie², Fu Jin¹, Hu Yu¹

¹ University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054

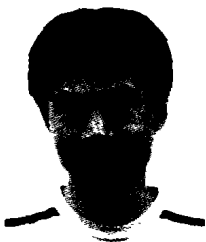
² Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

³ Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900

Received date:2004-02-20

Abstract The intra-satellite wireless optical communication links provide the foundation for the intra-satellite wireless optical network communication. For guaranteeing high quality of the links, the intra-satellite noise-immune technology, the intra-satellite multipath-immune technology and so on are crucial. The parameters of the intra-satellite optical communication instruments, especially the weight, the size and the power consumption, must fit the satellite environment for implementing. The way to do research on the intra-satellite wireless optical network communication is that to fuse the wireless optical network communication technologies and implementation into the satellite technologies and implementation. To utilize the unique characteristics of carrier running in the satellite environment is highly important too. The key components of the novel intra-satellite wireless optical network communication technology are the intra-satellite wireless optical adaptive encoding and modulating technology with the impulse waveform technology, the intra-satellite wireless optical complex noise cancelling technology, the intra-satellite wireless optical posterior equalization technology, the intra-satellite wireless optical order trussing demodulating and decoding technology etc. All those must work in the satellite temperature with stress technology and so on. By implementing them, the intra-satellite wireless optical system have stood the test for intra-satellite wireless optical both one point to one point link and one point to multi-points links. Furthermore, technologies of higher layers make the wireless optical network run high efficiently with high Quality of Service (QoS).

Keywords Intra-satellite wireless optical communication network; Adaptive encoding and modulating with the impulse waveform; Intra-satellite wireless optical complex noise cancelling; Intra-satellite wireless optical posterior equalization



Cai Ran was born in 1967, senior assistant researcher, PhD, is doing research on optical signal processing and optical communication at University of Electronic Science and Technology of China. He was award the prize for infrared signal gaining and processing. His research interests include technologies of optical communication systems, new technologies and optical devices for optical communication systems, especially the technologies of wireless optics.