

卫星通信中柔性转发技术研究^①

张 飞¹, 张更新¹, 王可青², 蒋丽凤³

(1. 解放军理工大学通信工程学院, 南京 210007; 2. 总参第 63 研究所, 南京 210007;

3. 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710100)

摘 要: 文章介绍了柔性转发技术产生的应用背景和基本理论, 分析了 WGS 柔性转发器的基本工作过程和原理, 总结了实现过程中的主要关键技术, 为解决卫星移动通信将面临大容量、多波束的连接任务, 提供了必要的理论依据和技术支撑。同时, 将柔性转发器与传统转发器相比较, 指出了柔性转发器具有高功率效率和高灵活性等优点, 能够实现卫星信号和资源的灵活交换。

关键词: 柔性转发器; 数字信道化; 多相滤波; Wideband Global Satellite (WGS)

0 产生背景^[1,2]

通信卫星以其通信距离远、覆盖范围广、无国界等特点, 得到了各国政府的大力发展。目前, 卫星通信系统已经从传统的单频点、单业务、单星单波束, 发展成为多频段、多业务、多星多波束。多波束通信卫星主要采用弯管式有效载荷(透明转发)与处理式有效载荷两种转发器。

弯管式有效载荷中, 卫星不对用户信号进行处理, 信号体制与转发器无关, 使用灵活。星上信号交换通过模拟滤波器和中频交换矩阵完成, 对物理层(调制方式、编码方式等)依赖甚微, 载频没有大的变化, 物理层的变化对有效载荷的设计没有影响, 可见它具有较强的适应性和灵活性。然而, 由于星上微波交换矩阵都是硬连接, 其路由选择方式是固定的, 无法适应业务量的变化; 而且信号交换是通过模拟滤波器和中频交换矩阵来实现的, 交换带宽通常为一个转发器的带宽, 如 36MHz、54MHz 或者 72MHz 等, 甚至以波束为单位进行信号星上铰链。如果要进行较细粒度的交换, 则交换矩阵的复杂度会显著提高, 往往超出了微波开关矩阵的能力。

再生式有效载荷中, 卫星转发器通过下变频、解调译码接收信号为基带信号, 对基带信号经过交换处理后, 再编码、调制、上变频发射出去。这种方式提高了系统的功率资源利用率和系统的容量, 而且它可以通过采用自适应编码调制技术来进一步提高系统容量。显然, 这种有效载荷对物理层具有内在

的和固有的依赖关系, 随着地面技术标准或者通信协议的更新, 有可能使得星载处理器不能正确接收数据, 灵活性不如弯管式有效载荷高。

考虑到以上两种转发器的优缺点, 为了提高卫星资源的有效利用和灵活可靠传输, 针对作战任务的多样性, 美军设计研制了基于非均匀滤波器组的星载数字化处理转发器, 即柔性转发器, 并将其搭载在宽带全球卫星(Wideband Global Satellite-WGS)上。

柔性转发器主要采用数字化处理方式, 利用灵活的星上信道化滤波技术, 借助非均匀滤波器组实现对星上信号的综合和分析, 支持星上任意频段、任意带宽之间信息交互及灵活的跨波束交互, 从而很好地解决了弯管式和再生式有效载荷存在的问题, 规避了卫星通信体制的约束, 使系统具有灵活选择合适的通信体制、划分最佳信道、临时组网的能力, 提高了通信的灵活性与可靠性, 实现卫星信号和资源的灵活交换。

1 WGS 卫星星载柔性转发器

1.1 WGS 卫星基本情况^[3]

WGS 卫星使用 X 频段和 Ka 频段, 具有 19 个独立的波束, 分别为 9 个 X 频段波束, 10 个 Ka 频段波束, 其中 X 频段主要支持军用固定业务, Ka 频段主要支持 GBS 业务, 它们可以业务互用。这 19 个波束由 13 副天线产生, 其中 X 频段 3 副, 分别为 1 副 8

① 收稿日期: 2012-02-17; 修回日期: 2012-03-16

波束相控阵接收天线,1副8波束相控阵发射天线和1副全球覆盖喇叭天线;Ka频段10副天线,其中8副为窄覆盖的指向机械可控的碟形天线(GDA),另外2副是宽覆盖的GDA。一颗WGS卫星总的交换容量为4.875GHz,分为39个信道,每一个信道带宽为125MHz。每一个信道又分为48个基本子带信道,带宽为2.6MHz。每路信号可以占用一个或多个相邻的2.6MHz基本子带信道。卫星的交换功能强大,能够实现波段间的连通,即系统提供“any-coverage-to-any-coverage”能力,能实现X频段和Ka频段的互通,各路信号可以在各信道间(内)进行交换。星载数字处理转发器起着群交换的作用,被普遍认为是WGS星上关键技术。

1.2 系统的组成框图

基于柔性转发器的卫星移动通信系统包括星载柔性转发器、运行管理中心及信关站组成,系统功能框图如图1所示。

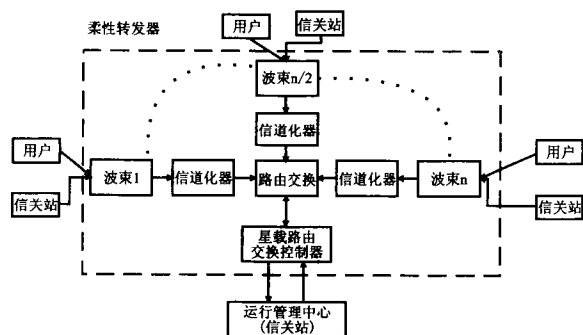


图1 基于柔性转发器的卫星移动通信系统功能框图

星载柔性转发器包括信道化器、路由交换、星载路由交换控制器(指令系统),由信道化器完成接收的多波束信号的分解与合成,并根据指令系统接收的来自地面运行管理中心的指令,设置路由交换矩阵,实现多波束用户信号的交换。

信关站主要用于管理各波束信号的业务链接,监测用户信号的质量,维护系统的正常运行。

运行管理中心根据用户的申请,分配用户的资源,配置星载路由交换控制器,完成信号交链,并根据各波束信关站的监测,与用户终端配合,实现链路的动态增益调整。

数字处理转发操作流程可以大致归纳如下:

(1) 用户通过信令信道向运行管理中心申请资源,运行管理中心通过监测上下行链路资源,只有在双向资源均满足情况的前提下才能完成信号的转

发。同时计算获知地址信息,并将该信息发送给卫星;

(2) 用户在获得允许后,转入业务子网,根据分配的信道带宽向卫星发送信息;

(3) WGS卫星收到各波束覆盖区域内的信号,在接收端将多路接收信号经过低噪放,下变频器、带通采样,并根据一定的映射关系被划入39个125MHz的子带信道。子信道之间具有独立的路由关系,按照已经收到的各子信道独立的路由信息,通过信道化滤波后进行星上信号交换处理,从而实现波段间的互通,即“any-coverage-to-any-coverage”。

(4) 交换完成后,各路信号通过上变频器、波束选择器,并由多波束天线发往目的地址,从而完成用户通信。

1.3 星载柔性转发工作原理^[4,5]

星载数字处理转发技术主要完成了星上多路信号的群交换,适用于多路信号星上可变带宽群交换,采用均匀滤波器组实现信号的非均匀滤波,其核心思想是使用一组分析滤波器和一组成分滤波器组完成信号的分析、交换和合成;其本质是先把信道划分为多个均匀带宽的子带,这些子带能够完全表示各路信号,再根据先验条件进行合成。以下只考虑信道内的群交换,信道间的群交换是基于信道内的群交换的。

假设卫星接收端,一个信道接收的信号经过低噪放,模拟降频到中频,带通滤波,带通采样,信号频谱已经到达基带,可以表示为:

$$y(n) = \sum_{r=0}^{P-1} \{x_r(n) e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot n}\} \quad (1)$$

其中, $x_r(n)$ 为第 r 路信号的基带信号,占有一个或多个基本子带信道带宽, f_r 为第 r 路信号的数字载频, P 为信号路数。

数字处理转发技术信号流程图如图2所示。

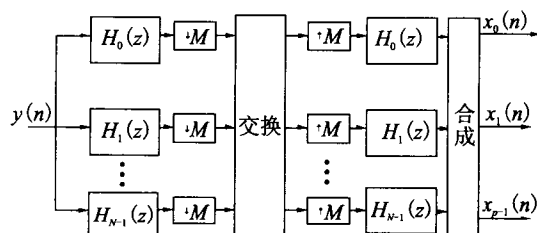


图2 分析合成法信号重构图

信号经过一组分析滤波器后进行抽取和插值,

再经过一组合成滤波器重构信号。其频谱流程示意图如图3所示。

图3(a)是信道基本子带信道分布示意图,这里假设共有 Q 个基本子带信道,则每个基本子带信道带宽为 $\frac{2\pi}{Q}$,各基本子带信道中心载频为 $\frac{2\pi}{Q}k + \frac{\pi}{Q}$ ($k=0,1,\dots,Q-1$), Δ 是各基本子带信道间的间隔。

图3(b)是各路信号的频谱示意图,分别占有一个或几个基本子带信道带宽。

图3(c)是分析滤波器组的频谱示意图,分析滤波器能够完全表示各路信号,这里基本子带信道用两个最小子带信道来表示,则最小子带信道带宽为 $\frac{2\pi}{N}$,各最小子带信道的中心频率为 $\frac{2\pi}{N}k + \frac{\pi}{N}$ ($k=0,1,\dots,N-1$)。

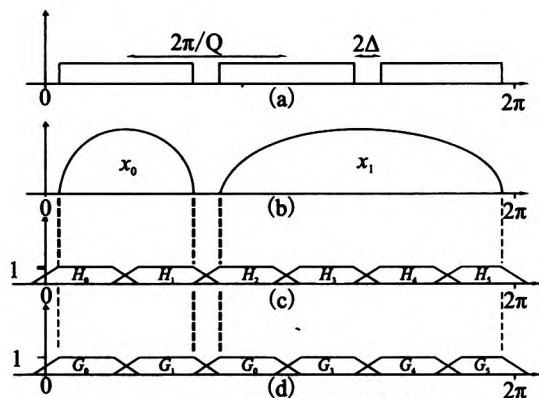


图3 分析合成法信号重构频谱图

图3(d)是合成滤波器组的频谱示意图,与分析滤波器组是完全一样的。

现在选择图3(b)中的信号 x_0 来分析其重构的过程。根据图3(b)所示,信号 x_0 可以由分析滤波器 H_0 和 H_1 来表示,表示为 $x_0H_0 + x_0H_1$ 。然后再经过抽取 M 和插值 M ,就可以实现信号 x_0H_0 和信号 x_0H_1 以 $\frac{2\pi}{M}m$ ($m=0,1,\dots,M-1$)进行频谱搬移。再经过合成滤波器组,重构信号 x_0 ,可以表示为:

$$\frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x_0 H_0 (e^{j(\omega - 2\pi k/M)}) G_{c_k} + \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x_0 H_1 (e^{j(\omega - 2\pi k/M)}) G_{c_k+1} \quad (2)$$

式中的 c_k 表示需要信号 x_0 重构后出现的频谱起始最小子带信道位置。

这里需要说明的几个问题是,为了灵活的实现带宽重分配,即信号能够实现基本带宽最小 $\frac{2\pi}{Q}$ 的位

移。就需要抽取和插值 M 满足 $M=BQ$,其中 $B \geq 1$ 且为整数。为了在抽取过程中避免混叠,要求:

$$\begin{aligned} (\frac{2\pi}{N} + 2\Delta)M &\leq 2\pi \\ \Rightarrow M &\leq \frac{N}{1 + N\Delta/\pi} \\ \Rightarrow M &\leq \frac{N}{1 + N\Delta/\pi} < N \end{aligned} \quad (3)$$

设 $N=AQ$,则 $N=AQ=\frac{AM}{B}$,其中 $A > B, B \geq 1$ 。

在实际的群交换过程中,可以把分析滤波器组和抽取用一个高效的多相DFT结构来代替,同样的插值与合成滤波器组也可以用一个高效的多相DFT结构来代替。

这种群交换结构很适用于多信道卫星上信道间(内)的交换,这种结构具有各路信号带宽分配灵活,完美的信号重构,实现简单的优点。当最小子带信道个数为2的整数次幂时,用FFT代替DFT,更能简化运算。

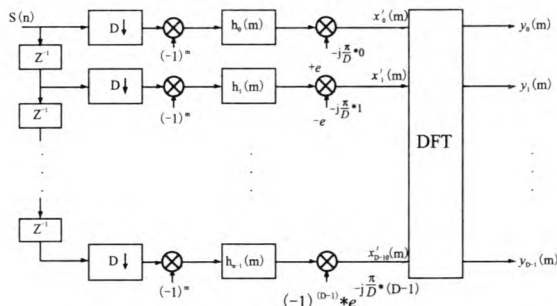


图4 信道化多相滤波器组结构

1.4 仿真分析

按照美军WGS的设计要求, $Q=48, N=96, M=48, A=2, B=1$ 。基本子带信道带宽为2.6MHz,最小子带信道带宽为1.3MHz, $\Delta=0.1$ MHz,假设输入信号有3路,分别占有1个、2个、4个基本带宽,起始的最小子带信道位置分别为:0、2、6,信号带宽为2.4MHz、4.8MHz、9.6MHz,采用QPSK调制方式,滚降系数为1。目标是第一路信号向右移动2个基本带宽,第二路信号向右移动4个基本带宽,第三路信号向右移动10个基本带宽。分析滤波器组和合成滤波器组的原型滤波器选用开根号升余弦滤波器。仿真结果如图5、图6、图7所示。

经过分析滤波器组后,再经过抽取、插值、合成滤波器组,三路信号的频谱图如图7所示。

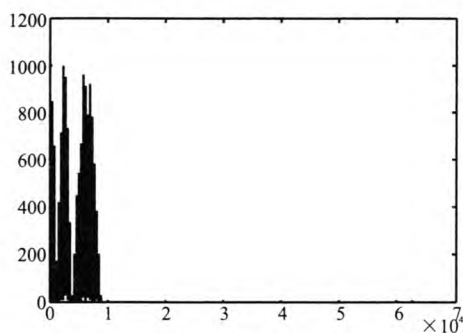


图5 仿真输入信号频谱分布图

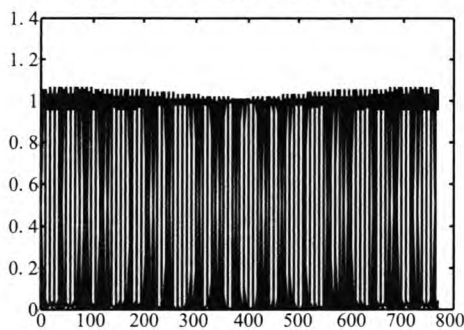


图6 仿真分析滤波器组频谱图

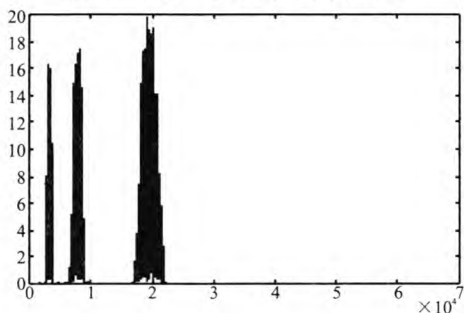


图7 仿真信号频谱位移图

在WGS中,采用分析合成结构,原始均匀滤波器组的分析滤波器组的输出被合成均匀滤波器组的综合部分重新组合,从而得到非均匀的滤波器组,这种结构设计非均匀滤波器组的方法称作间接方法。而且其可变带宽一般不是任意的,每路信号一般占有一个或几个基本子信道带宽。Kovacevic提出了一种直接设计完全重构非均匀滤波器组的方法,较之间接结构,非均匀滤波器组的直接结构能够更自由地对滤波器的性能进行控制。

2 柔性转发器关键技术^[2,6]

2.1 低损伤信道化器的设计

针对未来移动卫星通信业务的多频段、多业务、多速率的情况,各波束业务复杂并存在时变特性,需要在卫星柔性转发器中设置近似精确地信号分析与

综合滤波器,完成系统波束内业务的分离,为实现波束间业务交换提供先决条件。目前采用柔性转发技术的有效载荷多以均匀滤波器组来实现,对于可变带宽信号的分析重构,均匀滤波器组已经不能满足实际的需要,因此,各种非均匀滤波器组的结构被提出来。由于优化的参数较多,设计完全重构的非均匀滤波器组是比较困难的。同时,滤波器的线性相位性质是必须的,在设计非均匀滤波器组的方法中,能够设计得到具有线性相位的非均匀滤波器组的方法并不多。因此需要研究设计高阻带衰减、线性相位特性、频带非均匀划分的滤波器组,解决交换后信号的准完全重构问题,研究有效的干扰剔除技术,保证信号的极低损伤和卫星业务的高效交换和通信质量。

2.2 多波束信道化信号路由交换技术

由于下一代移动通信卫星面对大容量、多波束、复杂连接的问题,移动卫星通信网内用户节点及通信业务的实时变化必然导致卫星通信网内节点资源调度频繁的问题。要在低延迟下保障用户的通信质量,使得星载柔性转发器可以根据地面设置质量,实时的调整路由交换矩阵,确保用户信号的灵活交换,需要研究天地协同的路由刷新机制与交换策略,解决大容量、复杂连接情况下通信质量下降的问题。一方面需要优化路由交换的结构,保证信号的灵活性、可靠交换性,降低交换时延;另一方面,重点研究路由刷新机制,保证星载路由交换的实时动态刷新,避免由于星载路由切换时延降低系统利用率,损失性能。

2.3 资源优化与链路动态管理技术

柔性转发器是基于频分多载波系统,系统的高效运行需要解决由于功放的非线性引入的大载波抑制小载波、互调干扰等问题,以及优化系统内各波束载波的配置,避免三阶互调等互调噪声的影响。一方面,在用户申请接入时,考虑该用户对其他现有用户的影响,以及星载路由交换的适应性,研究多波束用户信号频率资源的优化配置,包括功率、频率、带宽等,生成路由交换矩阵,控制信道化参数,提高系统的资源利用率;另一方面,在系统运行过程中,需要联合多地球站,以各点波束信关站为基础,完成系统信道特性的检测,监测信号质量,通过信道的增益控制技术进行用户信号参数的动态调整,保证系统通信的可靠性。

2.4 高频段宽带卫星信号的采样与恢复实现

星载柔性转发以数字信号处理技术为基础,其实施的前提是信号的模数转换。对于高频段宽带信号而言,基于 Nyquist 采样定理的信号采样和恢复方法有着的致命弱点:采样率太高并且给后续数字信号处理带来巨大压力。基于压缩传感理论的次 Nyquist 采样方法,以低于 Nyquist 采样率的方式对宽带信号进行采样,得到的信号样点的频域信息非常不完整。目前,在压缩传感和稀疏恢复理论框架下,信号恢复算法主要有两类,即以预设误差容限为终止条件的匹配追赶算法,以及以预设迭代次数为终止条件的匹配追赶算法。在此基础上,需要探求一种新的次 Nyquist 采样与信号恢复的联合算法,提出基于次 Nyquist 采样方法下信号恢复算法。该技术的研究,可以为高频段宽带星载柔性转发器的实现奠定基础。

3 结束语

文章通过对弯管式有效载荷和再生式有效载荷优缺点的分析,阐述了柔性转发器以其高可靠性和灵活性的优势将成为下一代通信卫星转发器的主要发展方向之一。柔性转发器兼具再生转发有效载荷和弯管转发有效载荷的优点,同时又规避了卫星通信体制的约束,既具有较高的系统容量,又能够在轨灵活地实现卫星转发器的重构,满足可变带宽业务的需求。文章以现有 WGS 卫星为背景,分析了 WGS 卫星星载柔性转发器的工作过程与原理,并对其具体实现过程给出了简单的仿真结果,总结了柔性转发器在实现过程中将要解决的具体关键技术。研究柔性转发器技术,掌握其工作原理,突破其关键技术,对发展我国下一代大容量、多波束通信卫星具有重要的工程应用价值。

参考文献:

- [1] Angelettil P, Gaudenzi R D. From “bent pipe” to “software defined payloads”: evolution and trends of satellite communications systems [C]. Proc. of the 26th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, San Diego, CA, 2008, 292 ~ 301.
- [2] Butash T C, Marshall J R. Leveraging digital on-board processing to increase communications satellite flexibility and effective capacity [C]. Proc. of the 28th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, Anaheim, California, 2010, 113 ~ 122.
- [3] 张更新,王守东. 宽带多媒体卫星通信系列讲座之美军的宽带全球卫星-WGS 系统[J]. 数字通信世界. 2009 (11): 81 ~ 84.
- [4] 徐健. 星载可变宽带群处理技术研究 [D]. 解放军理工大学, 2010.
- [5] 徐以涛. 现代数字信号处理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2009.
- [6] Eldar Y C, Mishali M. From theory to practice: sub-Nyquist sampling of sparse wideband analog signals [J]. IEEE J. Sel. Topics Signal Process, 2010, 4 (2): 375 ~ 391.

作者简介:

张 飞 1985 年生, 硕士, 通信与信息系统专业。主要研究方向为卫星通信。

张更新 1967 年生, 教授, 博士生导师。主要研究方向为卫星通信。

王可青 女, 1988 年生, 硕士。主要研究方向为军事通信对抗。

蒋丽凤 女, 工程师。主要研究方向为卫星通信。

Technique of Flexible Transponder in Satellite Communications

ZHANG Fei¹, ZHANG Geng-xin¹, WANG Ke-qing², JIANG Li-feng³

(1. College of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2. The 63rd Research Institute of PLA General Staff Headquarters. Nanjing 210007, China;

3. Xi'an Institute of China Academy of Space Technology. Xi'an 710100, China)

Abstract: The application background and principal theory of flexible transponder technology are introduced. The basic

(下转第 23 页)

4 结论

文章针对存在压制型诱饵干扰条件下的空中目标成像跟踪问题,提出了基于事件分析的跟踪方法,对传感器指向变化进行特定约束,在指向不变的时间内利用平台惯导信息对目标位置进行预测,然后根据自适应跟踪窗内的成像特征变化对目标抛出诱饵、目标与诱饵分离等异常事件进行分析并对真实目标和诱饵进行区分,使用仿真和实测数据对跟踪算法的有效性进行了验证。

参考文献:

- [1] 李丽娟,黄士科,陈宝国. 双色红外成像抗干扰技术[J]. 激光与红外,2006,36(2):141~143.
- [2] Wim de Jong, Sebastiaan P. van den Broek, Ronald van der Nol. IR seeker simulator to evaluate IR decoy effectiveness[J]. in Proc. SPIE,2002,4718:164~172.
- [3] Wu Xiao-di, Lv Xiang-yin, Yang Hua et. al. Surface Temperature Distribution and Infrared Radiation Feature of a

Spatial Balloon Decoy[J]. in Proc. SPIE, 2009, 7383: 73831M-1-73831M-10.

- [4] Wim de Jong, Frans A M Dam, Gerard J Kunz, et al. IR seeker simulator and IR scene generation to evaluate IR decoy effectiveness[J]. in Proc. SPIE Technologies for Optical Countermeasures,2004,5615:100~111.
- [5] 李丽娟. 红外成像空空导弹的抗干扰分析[J]. 光电对抗与无源干扰,1999(2):1~8.
- [6] 汪朝群. 红外诱饵对红外制导导弹的干扰特性及仿真[J]. 红外与激光工程,2001,30(4):163~167.

作者简介:

李 勳 女,1974 年出生,工学博士,高工。研究方向为图像分析与目标识别、图像制导智能化信息处理、实时并行处理等。

孙协昌 1982 年出生,工学博士,工程师。研究方向为成像目标检测识别,图像分析与计算机视觉。

Anti Oppressive Decoys' Aerial Target Tracking Algorithm Based on Occurrence Analysis

LI Meng, SUN Xie-chang, XU Jing

(Space Star Technology Co., Ltd., China Academy of Space Technology, Beijing 100086, China)

Abstract: This paper presents an approach for tracking airborne target against oppressive infrared decoys. The proposed approach first determines an adaptive tracking window. The center of the tracking window is set at a predicted target position which is computed based on uniform motion model. Different strategies are applied for determination of tracking window size according to target state. The most similar candidate target is associated to the tracking target by using a decision function, which calculates a weighted sum of normalized feature differences between two comparable targets. Integrated intensity ratio of association target and tracking target, and target centroid are examined to estimate target state in the presence of decoys. The tracking ability and robustness of proposed approach has been validated by simulated infrared image sequences containing airborne targets and oppressive decoys.

Key words: Aerial target tracking; Oppressive decoys; Occurrence analysis

(上接第 13 页)

process and theory of Wideband Global Satellite (WGS) flexible transponder are analyzed. The paper summarizes the key technologies in transponder realization, which provides essential theoretical bases and technical support for solving the high-capacity and multi-beam connection of satellite mobile communication. At the same time, compared with the traditional transponder, the flexible transponder has the advantages of high power efficiency and high agility, which can achieve satellite signals and resources flexibly exchange.

Key words: Flexible transponder; Digital channelization; Multi-phase filter; Wideband Global Satellite (WGS)