

Z427/1033(2008)-(21)B



NUAA2009044435

Z427
1033(2008)-(21)B

信息科学与技术学院

041~044~045 系

下册



2009044435

21

137	孙心宇 连小华 周建江	博士生 博士生 教授	042 042 042	Robust adaptive beamforming based on maximum likelihood estimation	2008年 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology 会议交 流	
138	苏 抗 周建江	博士生 教授	042 042	卫星隐身技术发展概述	隐身技术	2008.00.03
139	米志超 周建江	博士后 教授	042 042	一种能量均衡的无线传感 网络生命期优化算法	系统工程与电子技术	2008.30.12
140	王 菁 周建江	博士生 教授	042 042	Modified MEMP Method for 2D Scattering Center Measurement Based on GTD Model	2008年 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology 会议交 流	
141	夏伟杰 周建江	中 级 教授	042 042	A Raw Signal Simulator for the squint bistatic SAR	2008年 9th International Conference on Signal Processing 会议交流	
142	夏伟杰 朱劼昊 周建江	中 级 博士生 教授	042 042 042	A Raw Signal Simulator for the side-looking bistatic SAR	2008年 International Symposium on Antennas, Propagati on and EM Theory 会议交流	
143	雷 磊 许宗泽	中 级 教授	042 042	基于地理位置信息和功率 控制的ad hoc网络并行 MAC协议	通信学报	2008.29.09
144	雷 磊 许宗泽	中 级 教授	042 042	Ad Hoc 网络中DCF 公平 性分析与改进	电子与信息学报	2008.30.02
145	雷 磊 许宗泽	中 级 教授	042 042	IEEE 802.11 DCF 差错帧 模型的分析与仿真算法改 进	电子与信息学报	2008.30.05
146	刘金龙 许宗泽	博士生 教授	042 042	CARTESIAN认证码的原理 及构造	电子与信息学报	2008.30.01
147	刘金龙 许宗泽	博士生 教授	042 042	任意信源数和认证符数的 Cartesian认证码的构造 (II)	电子与信息学报	2008.30.05
148	刘金龙 许宗泽	博士生 教授	042 042	笛卡尔积与认证码	电子与信息学报	2008.30.06
149	王旭东 刘 渝	中 级 教授	042 042	一种基于FFT的超宽带数 字正交变换算法及实现	仪器仪表学报	2008.29.08

150	王旭东 刘 渝	中 级 教 授	042 042	基于修正Rife算法的正弦波频率估计及FPGA实现	系统工程与电子技术	2008. 30. 04
151	宋晓勤	中 级	042	Joint channel estimation algorithm for intra-frequency TD-SCDMA system	2008年IEEE International Conference Neural Networks and Signal Processing 会议交流	
152	宋晓勤	中 级	042	Improved channel estimation algorithm based on parallel interference cancellation	2008年IEEE International Conference Neural Networks and Signal Processing 会议交流	
153	邓振淼 刘渝 杨姗姗	博士后 教授 硕士生	042 042 042	多相码雷达信号调制方式识别	数据采集与处理	2008年23卷3期
154	邓振淼 刘渝	博士后 教授	042 042	基于全相位频谱分析的正弦波频率估计	数据采集与处理	2008年23卷4期
155	陈役涛 刘渝 邓振淼	硕士生 教授 博士后	042 042 042	基于相关累加的正弦波频率估计算法	数据采集与处理	2008年23卷6期
156	邓振淼 刘渝	博士后 教授	042 042	基于多尺度Harr小波变换的MPSK信号码速率盲估计	系统工程与电子技术	2008年30卷1期
157	胥嘉佳 刘渝 邓振淼	博士生 教授 博士后	042 042 042	任意点正弦波信号频率估计的快速算法	南京航空航天大学学报	2008年40卷6期
158	皮德常 秦小麟	副高 教授	042 042	A New Fuzzy Clustering Algorithm on Association Rules for Knowledge Management	Information Technology Journal	2008年7卷1期
159	崔延良 皮德常	硕士生 皮德常	042 042	A Combat Complex System Based on Artificial Life Life	2008年The International Conference on System Simulation and Scientific Computing会议上发表	
160	陶运信 皮德常	硕士生 副教授	042 042	基于邻域和密度的异常点检测算法	吉林大学学报（信息科学版）	2008年26卷4期
161	陶运信 皮德常	硕士生 副教授	042 042	A Neighborhood-Based Trajectory Clustering Algorithm	2008年IEEE Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System会议上交流	

162	陶运信 皮德常	硕士生 副教授	042 042	屏蔽输入参数敏感的异常点检测新方法	计算机科学	2008年35卷12期
163	皮德常 吴庆宪	副高 教授	042 042	国际大学生程序设计竞赛与培养创新人才	电子电气教学学报	2008年30卷3期
164	李伟通 皮德常	本科生 副教授	042 042	基于统计学习的自然语言对话系统的设计与实现	微计算机应用	2008年29卷7期
165	皮德常 冼楚华 秦小麟	副高 硕士生 教授	042 042 042	An improved C clustering algorithm	International Journal of Computer Systems Science and Engineering	2008年23卷1期
166	刘圣忠 宋茂忠 胡国华	硕士生 教授	042 042	一种基于FFT的GPS信号快捕算法	海军航空工程学院学报	2008年23卷2期
167	陈林 宋茂忠 宰云峰	硕士生 教授 硕士生	042 042 042	分布式自组织无线数据采集系统的软件设计	单片机与嵌入式系统应用	2008年2卷
168	宋茂忠 许宗泽 刘渝	正高 教授 教授	042 042 042	一种基于二维微波空间调制的通信跟踪系统	宇航学报	2008年29卷1期
169	宋茂忠 洪涛 陈林	正高 博士生 硕士生	042 042 041	发射方向调制信号的多波束调制技术	武汉大学学报（理学版）	2008年54卷1期
170	宋茂忠 洪涛	正高 博士生	042 042	DUAL BEAM MODULATION TRANSMITTED FROM TWO ANTENNAS WITHOUT A PHASE CENTER	Journal of Electromagnetic Wave and Applications	2008年22卷8-9期
171	宋茂忠 洪涛	正高 博士生	042 042	MICROWAVE APACE MODULATION CARRYING AZIMUTH AND ELEVATION TRANSMITTED BY MONOPULSE ANTENNA	Journal of Electromagnetic Wave and Application	2008年22卷2-3期
172	宋茂忠 洪涛	正高 博士生	042 042	SUM AND DIFFERENCE MULTIPLE BEAM MODULATION TRANSMITTED BY MULTIMODE HORN ANTENNA FOR INVERSE MON OPULSE DIRECTION FINDING	Progress In Electromagnetics Research	2008年82卷
173	洪涛 宋茂忠 刘渝 许宗泽	博士生 教授 教授 教授	042 042 042 042	一种微型飞行器时空调制OFDM通信与跟踪系统	电子与信息学报	2008年30卷10期
174	宋茂忠 许宗泽 刘渝	正高 教授 教授	042 042 042	发射二维方向信息的时空调制OFDM通信测向系统	电子学报	2008年36卷7期

175	李勇 朱岱寅 汪玲	副高 教授 讲师	042 042	STUDY ON THE GEOMETRIC DISTORTION CORRECTION ALGORITHM FOR CIRCULAR-SCANNING SAR IMAGING	IGARSS 2008 Proceedings	
176	胡军 黄志球 曹东 徐丙凤	副高 正高 中级 研究生	042 042 035 042	网构软件的资源自适应性的形式化分析与验证	软件学报	2008年19卷5期
177	毛新华 朱岱寅 李勇 朱兆达	博士生 教授 副教授 教授	042 042 042 042	环视SAR几何失真校正误差分析及补偿技术研究	电子与信息学报	2008年30卷11期
178	毛新华 朱岱寅 聂鑫 朱兆达	博士生 教授 副教授 教授	042 042 042 042	A two dimensional overlapped subaperture polar format algorithm based on stepped-chirp signal	SENSORS	2008年8卷5期
179	龚清勇 朱兆达	博士生 教授	042 042	Study on STAP Algorithm for Radar Target Detection in Heterogeneous	2008 Congress on Image and Signal Proceeding	2008年5卷
180	龚清勇 朱兆达	博士生 教授	042 042	通道幅相误差快速校正算法在空时自适应处理中的应用	南京航空航天大学学报	2008年40卷5期
181	赵军 朱兆达	博士生 教授	042 042	A Modified Direct Data Domain Method in Space-Time Adaptive Processing	在2008年IEEE International Conference on CIS and RAM	
182	胡文	中级	42	数字驱动模拟电路实现的混沌系统及其Lyapunov指数计算	在2008年中国第二十一届中国电路与系统学术年会会议上交流	
183	聂鑫 朱岱寅 朱兆达	博士生 教授 教授	042 042 042	Application of synthetic bandwidth approach in SAR polar format algorithm using the deramp technique	Progress In Electromagnetics Research-PIER	2008年80卷
184	沈明威 朱岱寅 朱兆达	博士生 教授 教授	042 042 042	基于多级维纳滤波器的非均匀 $\Sigma\Delta$ -STAP研究	电子与信息学报	2008年30卷6期
185	沈明威 朱岱寅 朱兆达	博士生 教授 教授	042 042 042	一种抗干扰目标的STAR算法	电子学报	2008年36卷3期

186	沈明威 朱岱寅 朱兆达	博士生 教授 教授	042 042 042	An Efficient Reduced-Rank STAR based on PASTd Algorithm	在2007年IET International Conference on Radar Systems会议上交流	
187	朱岱寅 朱兆达	正高 教授	042 042	Some aspects of improving the frequency scaling algorithm for dechirped SAR data processing	IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	2008年46卷6期
188	沈明威 朱岱寅 朱兆达	博士生 教授 教授	042 042 042	An improved scheme for the frequency domain Σ Δ -DPCA	在2007年IET International Conference on Radar Systems会议上交流	
189	朱岱寅	正高	042	A novel approach to residual video phase removal in spotlight SAR image formation	在2007年IET International Conference on Radar Systems会议上交流	
190	汪玲 朱岱寅 朱兆达	中级 教授 教授	042 042 042	机载ISAR舰船侧视和俯视成像时间段选择	电子与信息学报	2008年30卷12期
191	汪玲 朱岱寅 朱兆达	中级 教授 教授	042 042 042	Cross-range Scaling for Aircraft ISAR Images Based on Axis Slope Measurement	在2008年IEEE Radar Conference会议上交流	
192	沈明威 朱岱寅 朱兆达	博士生 教授 教授	042 042 042	Research on the frequency domain Sigma Σ Δ -DPCA	系统工程与电子技术 (英文版)	2008年19卷2期
193	朱岱寅 叶少华 朱兆达	正高 研究员 教授	042 外 042	Polar Format Algorithm using Chirp Scaling for Spotlight SAR Image Formation	IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems	2008年44卷4期
194	刘敏 张小飞 徐大专	博士生 副教授 教授	042 042 042	多用户MIMO-OFDM系统中基于延时信道状态信息的自适应传输方案	通信学报	2008年29卷5期
195	韩中波 徐大专	硕士生 教授	042 042	多通道超声波探伤系统软件设计与实现	仪器仪表学报	2008年29卷4期增刊III
196	郑生华 徐大专	博士生 教授	042 042	基于小波脊线-Hough变换的LEM信号检测	量子电子学报	2008年25卷2期
197	杜娜 徐大专	博士生 教授	042 042	Low complexity iterative receiver for Turbo-BLAST over frequency selective fading channels	西南交通大学学报 (英文版)	2008年16卷3期

198	杜娜 徐大专	博士生 教授	042 042	采用比特干扰抵消的低复杂度多用户空时迭代接收机	应用科学学报	2008年26卷3期
199	杜娜 徐大专	博士生 教授	042 042	成比例公平性约束下的MIMO-OFDMA资源分配方案	应用科学学报	2008年26卷5期
200	徐程 郑洪源	硕士生 副教授	042 042	基于小生境遗传算法的关联规则挖掘研究	中国制造业信息化	2008年23期
201	孔瑞祥 郑洪源	硕士生 副教授	042 042	基于SOA和ESB的运输管理系统的设计	交通与计算机	2008年5期
202	施化吉 郑洪源 丁秋林	正高 副教授 教授	042 042 042	一种自适应的同步音频水印算法	华南理工大学学报(自然科学版)	2008年09期
203	周良	副高	042	Relevant Feedback in Content-Based Engineering Drawing Retrieval	在2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering	
204	吴一全 潘喆 吴文怡	副高 硕士生 硕士生	042 042 042	二维直方图区域斜分阈值分割及快速递推算法	通信学报	2008年29卷4期
205	吴一全 丁坚	副高 硕士生	042 042	基于K-L展开式的车牌倾斜校正方法	仪器仪表学报	2008年29卷8期
206	吴一全 吴文怡 潘喆	副高 硕士生 硕士生	042 042 042	基于二维直方图斜分的最小类内方差阈值分割	仪器仪表学报	2008年29卷12期
207	吴一全 郝红杰	副高 硕士生	042 042	一种基于Trace变换的数字图像版权保护算法	中国图像图形学报	2008年13卷5期
208	黄骥 吴一全	硕士生 副教授	042 042	基于颜色对特征点主成分分析的车牌校正方法	中国图像图形学报	2008年13卷4期
209	吴一全 张金矿	副高 硕士生	042 042	基于改进的二维最大熵及粒子群递推的图像分割	计算机辅助设计及图形学学报	2008年20卷10期
210	吴一全 郭建军	副高 硕士生	042 042	基于Contourlet变换的自适应门限分形零树混合图像编码	光电子. 激光	2008年19卷12期
211	吴一全 罗子娟	副高 硕士生	042 042	基于最小一乘背景预测的红外小目标检测算法	光电工程	2008年35卷4期
212	吴一全 潘喆 吴文怡	副高 硕士生 硕士生	042 042 042	二维直方图斜分Tsallis-Havrda-Charvat熵图像阈值分割	光电工程	2008年35卷7期
213	吴一全 丁坚	副高 硕士生	042 042	基于边缘点投影方差最小的车牌倾斜校正方法	系统仿真学报	2008年20卷21期
214	吴一全 潘喆	副高 硕士生	042 042	基于最小类内绝对差和最大差的图像阈值分割	信号处理	2008年24卷6期

215	罗子娟 吴一全	正高 副教授	042 042	基于Contourlet变换的红外图像序列小目标检测技术	信号处理	2008年24卷4期
216	郭建军 吴一全	正高 副教授	042 042	基于Contourlet变换的嵌入式图像编码	电子测量与仪器学报	2008年22卷2期
217	吴文怡 吴一全	硕士生 副教授	042 042	基于Contourlet变换的红外弱小目标检测方法	红外与激光工程	2008年37卷1期
218	吴一全 陈飒 罗子娟	副高 硕士生 硕士生	042 042 042	基于无下采样Contourlet变换的图像融合	中国体视学与图像分析	2008年13卷2期

Robust Adaptive Beamforming Based on Maximum Likelihood Estimation

Xinyu Sun, Xiaohua Lian, Jianjiang Zhou

Department of Electrical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

Nanjing, 21001, China

sxy_s@hotmail.com

ABSTRACT

The adaptive beamformer has higher resolution and stronger interference rejection than the data-independent beamformer. However, the adaptive beamformer is very sensitive to the direction-of-arrival (DOA) errors of signal sources, the imperfect array calibration and the error caused by the near-far effect. The constrained least mean square algorithm is the most widely used in adaptive beamforming technique, which will degrade dramatically when the mismatch in look direction exists. In order to overcome its weakness, an adaptive beamforming technique based on maximum likelihood estimation (MLE) is proposed in this paper. This new method discussed in this paper chooses the performance surface which comes from MLE, instead of the power surface which employed in constrained LMS algorithm. Simulation results show that this algorithm improves the robustness against uncertainties in array manifold. Meanwhile two variable scalars are provided to adjust the convergence speed together.

Index Terms—adaptive beamforming, maximum likelihood estimation, constrained LMS, look direction error, robust beamforming

I. INTRODUCTION

Adaptive beamforming is a significant technology, which has been employed in wireless communication, radar, sonar, acoustics and seismology. Recently, several works have been done to improve the robustness in adaptive beamforming, against the mismatch and modeling errors, and enhancing its interference cancellation capability. The linear constrained minimum variance beamformer is one of the widely used adaptive beamformers presented in ([1]-[5]). In this algorithm, the weights are constrained to minimize the array output power. In practical scenarios, the performance degradation of this algorithm is pronounced, because most of these methods are much sensitive even to the slightly mismatch between the presumed and actual array response. Such a mismatch could be caused by look direction error [6], an imperfect calibration, unknown wavefront distortion and signal fading [7], near-far wavefront mismodeling, local scattering and other effects. Such errors cause the unsteadiness in algorithm. Diagonal loading technique is a widespread approach to improve the robustness against mismatch errors ([8]-[11]). However,

the major drawback of this technique is that it is not clear how to get the optimum value of diagonal loading level based on the recognized level of uncertainty constraint.

This paper presents a simpler robust array processing algorithm. The performance criterion used is maximum likelihood. In algorithm, the inverse of noise variance matrix is avoided. At the same time, a new variable scalar is proposed to control the output power. This algorithm is robust to look direction error and also provide good rejection performance for directional interference.

The rest of the paper is organized as follows. In section II, the constrained LMS algorithm is summarized. In section III, the ML-LMS algorithm is presented, which optimizes the robustness of beamforming and improves recursive implementation. Computer simulations and performance comparison are provided in section IV. Conclusions and points for future work are summarized in section V.

II. CONSTRAINED LMS ALGORITHM

The structure of the adaptive array beamforming is illustrated in Fig.1. The system is a line array of L sensor elements equispaced with half-wavelength. It is assumed that the desired signal, $x(t)$ is narrowband signal and the arrival direction θ is known as a prior. The received signal is expressed as follows,

$$X(t) = S_0 * s(t) + N(t) \quad (1)$$

Where S_0 denotes the desired signal arrival phase vector. $N(t)$ denotes a random noise component on elements, which includes background noise and electronic noise generated in the channel. It is assumed to be temporally white with zero mean and variance equal to σ_n^2 . The array correlation matrix is defined by,

$$R_{xx} = E[XX^H] \quad (2)$$

Where $E[\bullet]$ denotes the expectation and H denotes the complex conjugate transpose. And $N(t)$ denotes a stationary zero mean complex Gaussian random vector with covariance R_{nn} . A real-time constrained LMS algorithm for determining the optimal weight vector is

$$\begin{cases} W(n+1) = W(n) - \mu g(W(n)) \\ W^H S_0 = 1 \quad \forall n \end{cases} \quad (3)$$

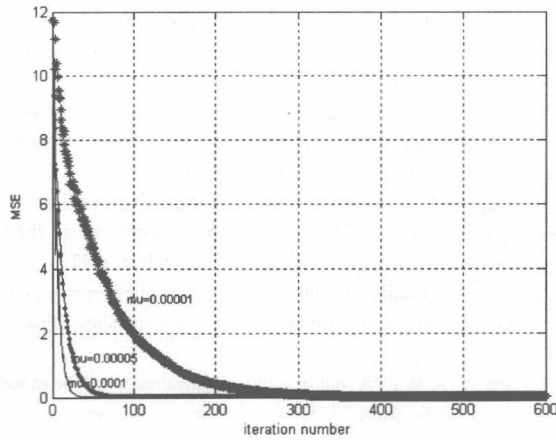


Fig.3. experiment: the convergence speed changes with μ using ML-LMS

the matrix inversion formula to R_{xx} and postmultiplying by S_0 , expressed as,

$$R_{xx}^{-1}S_0 = \frac{1}{1 + \alpha S_0^H R_{nn}^{-1} S_0} R_{nn}^{-1} S_0 \quad (9)$$

Where α denotes the desired signal power. Since, $S_0^H R_{nn}^{-1} S_0$ is a scalar and substituted by m . Rewrite the constrained ML-LMS algorithm as follows,

$$W(n+1) = W(n) - 2\mu' [tX(n+1)X^H(n+1)W(n) - S_0] \quad (10)$$

Where $t = S_0^H R_{xx}^{-1} S_0$, $\mu' = \mu(1 + \alpha m)$

Since R_{xx} is normally not available in practice, an estimate of it at each iteration is made by replacing R_{xx} by its noise sample $X(n+1)X^H(n+1)$. $X(n+1)$ denotes the array signal sample, also known as the array snapshot, at the $(n+1)$ th instant of time, which usually assumed to be modeled as the statistically independent observation vectors taken from a mean multivariate complex Gaussian distribution.

The noise satisfied a stationary zero mean complex Gaussian distribution is the precondition of the ML criterion. However, in this algorithm, Gaussian distribution is no longer the necessary condition. This algorithm is also effective when noise is uniform distribution or exponential distribution.

The difference between the ML-LMS algorithm and the constrained LMS algorithm is the decision criteria. In other words, the surface used for calculating the gradient is not the same. Compared with the constrained LMS algorithm, ML-LMS algorithm omits a constrained matrix. So, the com-

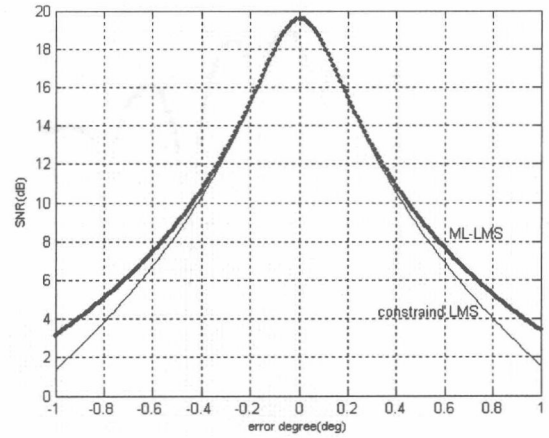


Fig.4. output SNR with error degree from -1 to 1 degree

plex of the computation is greatly decreased and the storage demand is reduced. Here the scalar t is not still a constant. It is a variable scalar and adjusts the output power. In this algorithm, two variable scalars control the convergence together.

For $0 < \mu' < \frac{1}{2t\lambda_{\max}}$, with $\lambda_{\max}$ denoting the maximum eigenvalue of R_{xx} , the algorithm is stable and the mean value of the estimated weights converges to the optimal weights. Since $\lambda_{\max} < \text{Tr}(R_{xx})$, where $\text{Tr}(R_{xx})$ denotes the trace of R_{xx} , which is equal to the average power measured on the corresponding element of the array and is measurable, one may select the gradient step size μ' in terms of quantities

using $0 < \mu' < \frac{1}{2t \cdot \text{Tr}(R_{xx})}$. In this expressing, t is a variable scalar, thus the range of μ' is adjustable, which improves the flexibility of the implementation.

IV. COMPUTATION AND SIMULATIONS RESULTS

In this section, computer simulations are carried out to investigate the performance of the proposed beamformer. A linear uniform array with eight array elements is taken into account. The direction of the signal arrival is assumed to be 0° . The direction of the two interference signals are 30° and -70° . Signal and interference are uncorrelated. The effects of the two variable scalars are shown in Fig.2-3. Fig4-5 illustrate the change of the signal to noise ratio (SNR), when the look direction is mismatched.

In Fig.2-3, the input signal is out of non-direction noise. The desired source power is 20dB and the powers of two interferences are both 30dB. Fig.2-3 show that the convergence speed

卫星隐身技术发展概述

苏抗 周建江

(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

摘 要 卫星隐身技术是现代空间攻防中必不可少的环节。本文首先介绍了现有反卫星武器的发展过程,分析了各类武器系统对卫星的探测方式及攻击制导方式;随后,对国外卫星隐身技术的发展进行了跟踪,对其隐身设计进行了描述,并对其设计思路进行了分析;最后,对卫星隐身技术的发展进行了简要的总结,并给出了对卫星隐身技术发展的展望。

关键词 卫星 隐身技术 雷达 激光 可见光 红外

1 引言

随着太空技术的发展,卫星的军事侦察、导航及数据中继能力日趋突出,在战争中具有越来越重要的战略及战术意义,因此,太空也渐渐成为各军事强国的新战场。卫星飞行轨道相对固定、无可利用空间遮挡物且防御能力有限,一旦轨道被测定,其过顶位置及时间将被准确预报,这不仅大幅降低了卫星的侦察效能,更使卫星暴露于反卫星武器的威胁中。卫星有限的发射重量及体积限制了各类防御设备的安装,其有限的能源也无法满足星体频繁变轨的需求,为提高在轨卫星的生存能力及其侦察效能,隐身技术成为了行之有效的技术手段。

2 卫星面临的威胁

卫星面临的威胁包括跟踪及打击两个方面。跟踪可获取卫星的飞行轨道,预报卫星再次过顶位置及时间,将卫星轨道信息与其目标特性结合还能对其用途进行识别;打击则将直接损害或摧毁卫星,使卫星丧失部分甚至全部的功能。

早在上世纪 60 年代初期,苏联及美国就开始了各自的太空防御计划,进行反卫星武

器的研究。由于当时制导系统能力有限,为保证对卫星的有效杀伤,其拦截弹头采用了核弹头,以大面积的杀伤来抵消制导精度的不足。

为避免大面积杀伤对临近区域卫星的伤害,苏联于 60 年代末期研制了共轨反卫星武器(Co-Orbital ASAT, COASAT)^[1,2]。COASAT 的攻击方式为:在目标卫星过顶时将反卫星导弹发射至临近轨道,随后通过光学及红外探测设备(早期型号采用雷达引导)将导弹引导至目标附近,并在 1km 的距离上引爆导弹,利用弹头预制碎片摧毁目标。COASAT 可用于打击轨道高度为 230km 至 1000km 的卫星。

1982 年,美国研制出新一代反卫星武器空射型微型飞行器(Air-Launched Miniature Vehicle, ALMV)^[1,2]。ALMV 是一种由战斗机从高空发射的两级火箭,可直接飞向近地轨道的目标卫星,通过冲击力对卫星实施动能杀伤。1985 年 10 月 13 日,美国使用 ALMV 成功摧毁了一颗在 555km 轨道上运行的卫星。同年,苏联也报道了一种可从米格-31 发

射的同类反卫星武器。

上世纪 80 年代末期,为避免动能杀伤反卫星武器产生碎片对其它卫星的威胁,美国开始了激光反卫星武器(Laser ASAT, LASAT)的研制。LASAT 攻击卫星不仅可以避免太空碎片的产生,同时还可以对卫星进行暗杀伤。目前美国 LASAT 包括中红外先进化学激光器(Mid-Infrared Chemical Advanced Laser, MIRACL)及化学氧碘激光器(Chemical Oxygen Iodine Laser, COIL)^[3]。其中最新的 COIL 激光器采用光学方式制导,可用于打击轨道高度为 500km 至 2000km 的卫星。俄罗斯也有同类反卫星武器的报道。

激光反卫星武器易受到天气的影响,同时其攻击效果也很难快速得到确认,因此上世纪 90 年代美国又恢复了动能反卫星武器的研究。1993 年,美国提出弹道导弹防御计划(Ballistic Missile Defense, BMD),其中战区导弹防御系统(Theater Missile Defense, TMD)具备了从海洋打击低轨卫星的能力^[4]。攻击采用标准-3 舰空导弹,导弹飞行前段由舰载“宙斯盾”系统为其提供制导信息,在飞行末端,导弹会采用自身携带的红外引导头进行精确制导。按系统设计目标,标准-3 舰空导弹最终将具备对轨道高度在 500km 以内的卫星的打击能力。2008 年 2 月 20 日,美国“伊利湖”号巡洋舰发的一枚标准-3 舰空导弹成功击毁一颗 241km 轨道上的失控军用侦察卫星^[5]。

可见,在反卫星武器系统中,雷达、激光、可见光及红外探测是发现、跟踪及识别在轨卫星的主要技术手段。雷达可在任何天气下对过顶卫星进行探测,获取卫星的基本位置信息及轨道信息;光学探测会受到天气情况的限制,但具备高于雷达的定位精度,可为

激光反卫星武器提供所需的精确制导数据;红外探测用于动能反卫星武器的末端制导,可在较近距离对卫星进行精确定位。

3 卫星隐身技术的发展

只要限制了对对手发现、跟踪、识别卫星的能力,也就限制了其反卫星能力,这样不仅提高了在轨卫星的生存能力,同时还可提高卫星的侦察效能。而隐身技术可通过改变卫星自身的目标特性,增加对手对卫星进行跟踪识别的难度,使卫星无法或很难被发现,正是实现这一目标的有效途径。

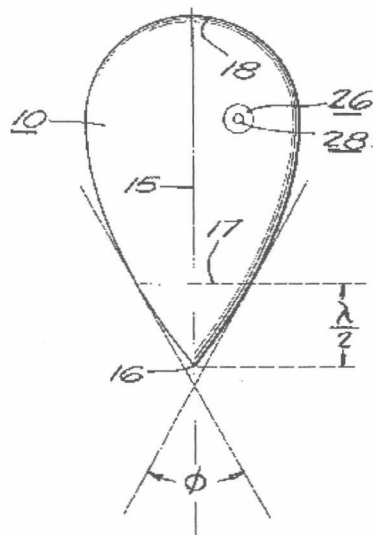


图 1 RCA 卫星隐身外形

美国卫星隐身技术是世界各国中发展时间最长、系统建设最完善的。早在上世纪 60 年代,为应对苏联的反卫星武器,美国从隐身飞机的设计中得到启发,开始了卫星隐身技术的研究。1962 年,美国航天科技公司首次提出了一种适用于卫星的雷达隐身外形 RCA(Radar Camouflage Arrangement)^[6],如图 1。RCA 为全金属圆锥形结构,直径 12m,高度 40m,具备对工作频率高于 100MHz 的地基雷达的隐身能力;结构外表面可涂覆厚度为 0.5cm 的薄型吸波材料,以增强卫星对

工作频率低于 15GHz 的雷达的隐身能力；同时 RCA 设计中还包括了星体开窗的雷达隐身设计，并首次提出了通过控制卫星姿态实现可见光隐身、通过热控系统将多余热量从卫星尾部散出实现红外隐身的设计思想。RCA 不仅实现了卫星雷达隐身的设计目标，还为美国卫星隐身技术的发展指明了方向，在隐身卫星发展过程中具有重要意义。

RCA 雷达隐身外形有两个问题阻碍了其工程应用：一是巨大的发射体积；二是沉重且带宽有限的吸波材料。针对上述问题，1967 年美国 Rockwell 公司设计了一种自展开结构 SES (Self Erectable Structure)^[7]，该结构重量轻，发射体积小，宽带吸波特性良好，并具备一定热屏蔽作用，如图 2。SES 由多层薄膜结构组成，底层薄膜为金属或涂覆导电材料的非金属薄膜，其它各层为阻抗特性各不相同的非金属吸波薄膜。两层薄膜间采用具有记忆效应的塑料结构连接；两层薄膜间距由所需的吸波带宽决定。当选择薄膜间距 8.5cm、结构总厚 60cm 时，SES 可有效吸收 120MHz 至 900MHz 的雷达入射波。

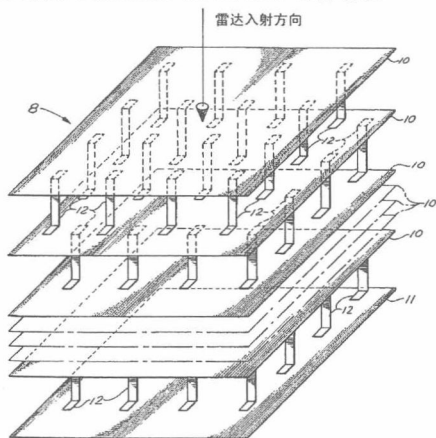


图 2 SES 吸波结构

1969 年，Rockwell 公司设计了一种采用 SES 的卫星隐身罩 VS (Vehicle Shield)^[8,9]，该隐身罩可为卫星提供雷达隐身能力，同时

其热屏蔽特性也可提供一定的红外隐身能力，如图 3。VS 由半个圆柱体及 2 个四分之一球体构成，其对地方向采用平滑的 SES 吸波结构，厚度 60cm，用来实现卫星对地基/机载雷达的隐身；其对天方向完全敞开，用于安装星敏感计、太阳能电池帆板及通信天线等设施。VS 为机械式自展开结构，发射过程中整个结构完全压缩在卫星内部；卫星入轨后，通过具有记忆效应的塑料支撑物使其恢复为设计外形。SES 的使用，有效控制了整个隐身罩的发射体积及重量；同时体积远大于星体的隐身罩，也为卫星提供了对更低频率雷达的隐身能力。VS 抛弃了传统的隐身外形，首次提出了卫星隐身罩的概念，在大幅降低卫星隐身设计难度的同时，也使得隐身设计更加有效；VS 还首次提出了通过改变星体目标特性，使得对方无法识别卫星用途的思想。

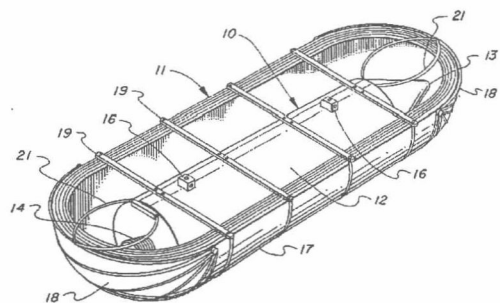


图 3 VS 隐身罩

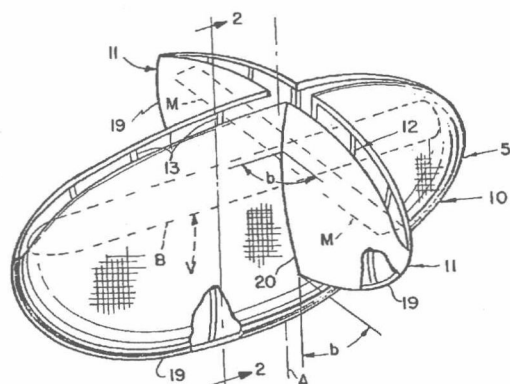


图 4 CSASS 雷达隐身罩

1971 年, 针对具有侧向伸展结构的卫星, 美国天合公司设计了一种卫星雷达隐身罩 CSASS (Crossed Skirt Antiradar Screen Structure)^[10], 如图 4。CSASS 为充气式自展开结构, 其表面由薄膜结构组成, 薄膜外侧覆盖有网孔直径小于雷达波长的导电金属网或金属薄膜, 内侧则安装有相互连接的塑料导管, 这些导管与膨胀气体源相连。发射时, CSASS 被压缩在星体内部; 卫星入轨后膨胀气体源打开, 使其恢复为设计外形, 实现对地基/机载雷达的隐身。CSASS 对地方向棱边采用连续变化的夹角及曲率, 以获得更小的对地方向雷达散射截面 (Radar Cross Section, RCS); 其不同结构间夹角均大于 100° , 以避免角反射器的产生。CSASS 设计中还提出了采用与隐身罩特性类似的干扰物^[11]增加对手跟踪、识别卫星难度的设计思路。

1971 年之后, 随着美苏外层空间条约的签署, 苏联停止了反卫星武器试验, 而美国也中止了卫星隐身技术的研究。直到 80 年代, 为应对美国“星球大战”计划, 苏联恢复了反卫星武器的研制, 而美国也再次开始卫星隐身技术的研究。

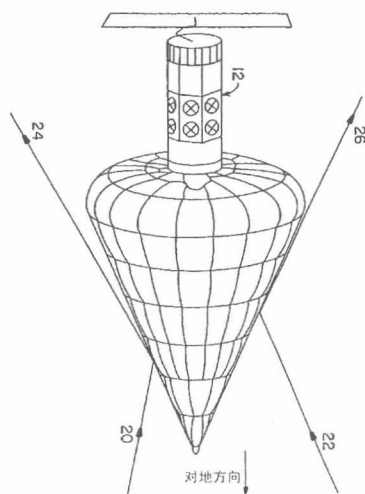
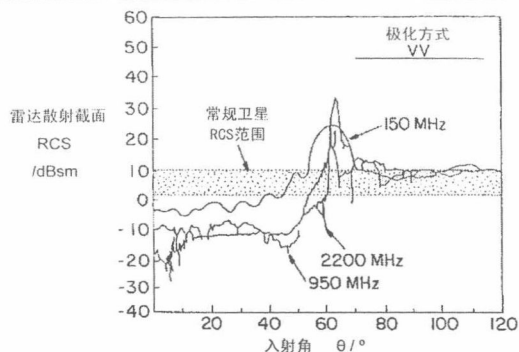


图 5 SSSS 隐身罩

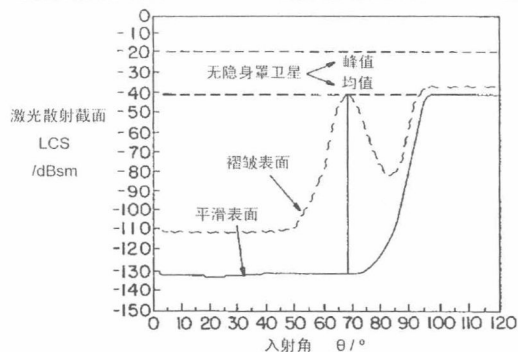
1990 年, 美国航天科技公司结合 RCA、VS 及 CSASS 的特点, 设计出新一代卫星隐身罩 SSSS^[12] (Satellite Signature Suppression Shield), 如图 5。该隐身罩设计目标为: 通过减弱卫星雷达、激光、可见光及红外信号特性, 使其无法或很难被地基/机载探测设备发现, 降低在轨卫星被对手跟踪、损害及摧毁的可能性。SSSS 为锥形充气式自展开结构, 其表面由厚度 1mm 的轻质合成薄膜构成, 薄膜外表面涂覆有厚度 $0.05\mu\text{m}$ 的高反射率导电材料 (金), 薄膜内表面则涂覆有紫外敏感胶体。隐身罩尖顶采用球形结构, 底部则涂覆有电损耗材料, 以获取更小的 RCS。隐身罩通过连接杆与星体连接, 使卫星可在不改变自身姿态的情况下将隐身罩最佳隐身角度指向威胁区域。图 6(a)-(d)给出了该隐身罩对雷达、激光、可见光及红外探测设备隐身能力的测试结果。SSSS 在对地方向放弃了只对雷达隐身有效的吸波材料, 而采用了具有 98~99% 反射率的镀金薄膜, 这样不仅可有效提高卫星的激光、可见光及红外隐身能力, 还可提高卫星的抗激光武器打击能力。在测试中, 用 $10\text{W}/\text{cm}^2$ 的高能激光武器 (High Energy Laser, HEL) 对顶角为 40° 的隐身罩进行照射, 结果表明至少 2 分钟的连续照射才能对隐身罩造成伤害。

1990 年 2 月, 美国发射了“Misty”隐身卫星发展计划中的第一颗卫星 Misty-I, 该星采用了 SSSS 隐身罩^[13]。

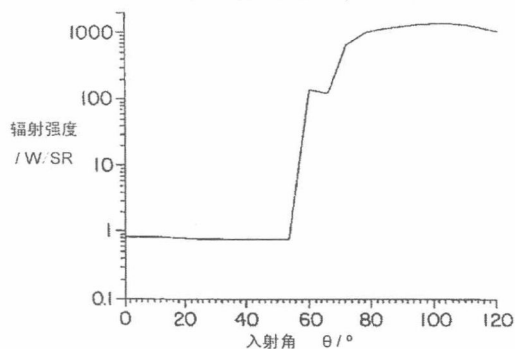
1999 年, 美国天合公司设计了一种适用于隐身卫星通信的共形相控阵天线^[14], 如图 7。该天线采用蜂巢布局, 每个子单元为正六边形的复合型旋臂结构天线。整个天线具有很低 RCS, 可工作于 2.4~11.2GHz 频率, 并可提供大于 1GHz 的通信带宽。



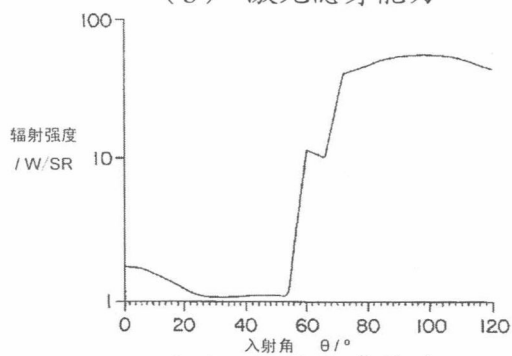
(a) 雷达隐身能力



(b) 激光隐身能力



(c) 可见光隐身能力



(d) 红外隐身能力

图 6 SSSS 隐身罩测试数据

1999 年 5 月, 美国发射了第二代 Misty 军用隐身卫星^[13]。

2005 年, 美国雷声公司设计了一种星载预警系统^[15], 其结构框图如图 8。该系统可利用卫星上行数据链的射频信号为星体建立一个电磁围栏, 当有目标进入围栏时, 利用接收到的经散射的射频信号, 系统可探测出接近目标的位置、速度及大小信息, 并可通过逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR) 成像对目标进行识别。星载预警系统的出现, 表明美国卫星隐身技术已进入主动躲避阶段。

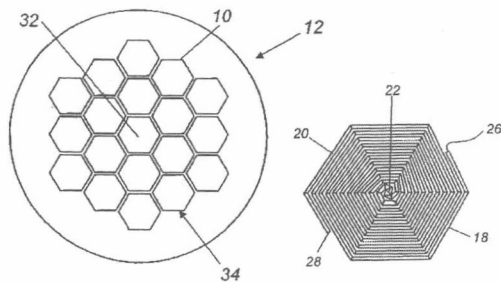


图 7 星载共形相控天线阵

2007 年, 有报道称美国发射了其第三代军用隐身卫星 Misty-III。

除美国外, 也有报道称俄罗斯在进行卫星等离子隐身技术的研究, 但具体情况未见报道。

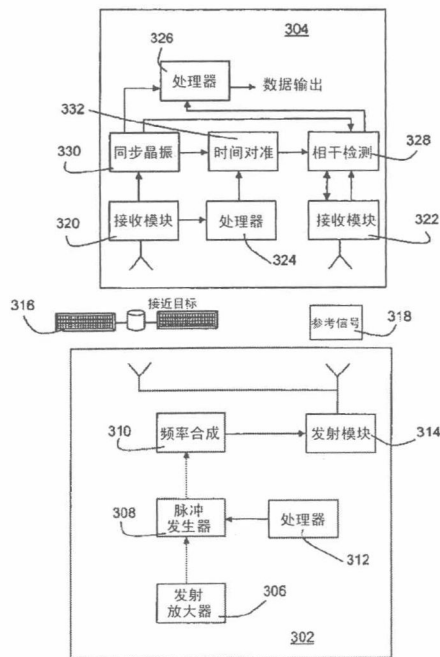


图 8 星载预警系统结构框图

4 总结及展望

由卫星面临威胁及卫星隐身技术发展可见,目前卫星隐身主要针对地基/机载雷达、激光、可见光及红外探测设备进行,其主要包括以下实现方式:

1) 具备自展开能力的隐身罩。隐身罩是简单有效的卫星隐身实现方式,与隐身外形相比,其设计过程中可更少地考虑卫星结构、能源及热控的需求,可将外形设计得更加简洁,这样不仅避免了对结构复杂、材料多样的卫星星体的散射分析,同时还可获得更优秀的隐身能力。而自展开结构可有效控制隐身罩的体积及重量,使其满足卫星发射的需求。

2) 适用于太空环境的卫星隐身材料。这些材料包括宽带雷达吸波材料、宽带雷达吸波结构、高反射率导电合成薄膜、频率选择表面等,用于配合隐身罩/隐身外形以获得更优秀的隐身能力。轻质、抗粒子撞击及抗太空辐射是这些材料研制中的关键。

3) 卫星隐身轨道及姿态设计。地面大型雷达及光学探测设施位置固定,卫星可跟踪自身位置对可能威胁角度进行预测,并调整隐身罩/自身姿态,使最佳隐身角度指向威胁区域。

4) 隐身星载天线设计。采用隐身罩的卫星,其隐身罩展开后将把星体对地部分完全遮挡(包括对地通信天线),这时卫星将只能利用对空通信天线、通过数据中继卫星完成与地面的通信;采用隐身外形的卫星,为降低自身 RCS,则会使用频率选择表面将其对地天线遮挡。对装备隐身罩的卫星,其可通信区域、通信实时性及速率都会受到数据中继卫星分布的影响,其对地电子侦察能力也会随着对地天线被遮挡而丧失;采用频率选择表面的卫星将难以实现宽带内的隐身,其

通信能力也会受到一定的衰减。与隐身罩/隐身外形共形的低 RCS、宽频带相控阵天线将是解决这些问题的有效途径。

5) 星载自主导航、预警及防御系统。具备自主导航控制的预备星及太空武器平台可在长时间内保持无线电静默,实现卫星的有源体隐身;雷达及激光照射告警系统可为卫星提供威胁方位信息,为卫星/隐身罩姿态的调整提供依据;具备预警及防御系统的卫星则可以对靠近目标进行跟踪识别,并对危险目标进行机动躲避防御,从而提升卫星的生存能力。

6) 等离子隐身及有源对消技术。目前广泛采用的隐身罩及隐身结构只具备对有限角度内的隐身能力,随着星载探测系统的发展,其隐身能力必将受到影响。未来的隐身卫星将会减少对隐身罩及隐身结构的依赖,全方位隐身是其必然的发展方向。等离子隐身及有源对消技术可在不影响其它隐身特性的情况下,降低卫星全方位的 RCS,是卫星全方位隐身的有效途径。

可见,卫星隐身技术已由早期的雷达隐身发展为包括雷达、激光、可见光及红外隐身的全方位隐身,其隐身方式也由传统的被动隐蔽发展为主动躲避。随着隐身罩、隐身材料、导航、有源隐身及电子对抗技术的不断发展,未来的隐身卫星还将具备更为完善的全方向隐身能力及抗打击能力。同时从其发展还可看出,卫星隐身技术是多学科交叉的技术,其发展、完善需要多学科不断的融合才能实现。

参考文献

(下转第 29 页)