

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.05.018

引用格式:黄晓卿.二次雷达数字时间灵敏度控制处理的实现[J].电讯技术,2015,55(5):570-573.[HUANG Xiaoqing. Implementation of Sensitivity Time Control Signal Processing for Secondary Radar[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(5):570-573.]

二次雷达数字时间灵敏度控制处理的实现*

黄晓卿**

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:如何有效剔除二次雷达系统中存在的干扰目标,提升设备的处理能力和效率,一直是系统最关注的方向之一。区别于传统信道接收机灵敏度简单调节的方法,提出了一种基于可编程门阵列(FPGA)实时计算目标应答信号强度的方法,通过设置有效应答信号范围,在应答脉冲处理阶段剔除时间灵敏度控制(STC)门限外由多径及异步等引起的干扰脉冲,减少了后期处理的信息数据,提升了系统效率和系统的多目标处理能力。通过外场实验验证,该方法能有效减少二次雷达系统内70%的虚警目标。

关键词:二次雷达;时间灵敏度控制;串扰;虚警;发射功率;接收灵敏度;多目标处理

中图分类号:TN958.96 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)05-0570-04

Implementation of Sensitivity Time Control Signal Processing for Secondary Radar

HUANG Xiaoqing

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

Abstract:How to effectively eliminate interference targets existing in secondary radar and improve equipment processing capability and effectiveness is the orientation of system design concerned. Different from the traditional method of simple channel receiver sensitivity adjustment, this paper proposes a method of real-time calculation of the target response intensity based on Field Programmable Gate Array(FPGA). By setting the effective response signal range and eliminating the multipath and asynchronous interference pulses outside the Sensitivity Time Control(STC) threshold in reply pulse processing stage, the amount of information data is reduced, the system efficiency and multi-target processing capability are improved. Field test shows that this method can effectively reduce 70% of the false targets in the secondary radar systems.

Key words:secondary radar; sensitivity time control; garble; false alarm; transmitting power; receiving sensitivity; multi-target processing

1 引言

随着飞机密度的日益增加,其造成的混扰、串扰、多径等各种干扰也变得更加复杂。二次监视雷达作为空中交通管制的一种重要手段,对目标的处理容量、处理速度和处理精度提出了更高的要求。

接收灵敏度表示接收机接收微弱信号的能力,

灵敏度越高就表示接收机接收微弱信号的能力越强,接收范围就越广。一次雷达系统中,可以在接收机中进行时间灵敏度控制(Sensitivity Time Control, STC),先进行射频衰减再进行中频衰减,提高接收机的抗过载能力^[1];也可以通过自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC)系统^[2],实现灵敏度时间

* 收稿日期:2014-12-26;修回日期:2015-04-20 Received date:2014-12-26;Revised date:2015-04-20

** 通讯作者:hjjhxq@sina.com Corresponding author:hjjhxq@sina.com

控制功能。在二次雷达系统中,STC 在实际应用中并没有进行深入的研究,常规的方法是手动调节信道接收机接收灵敏度的方法来限定询问机的接收范围,在公开发表文献中未查到类似数字 STC 处理方法的应用报道。

本文针对二次雷达系统协同工作方式中目标多、干扰复杂等特点,着重介绍了数字 STC 处理方法,通过信号处理终端数字电路硬件电路现场可编程门阵列(FPGA),实现自适应灵敏度控制,在降低成本和设计难度的同时极大地提高了询问机的目标处理能力,降低了虚警目标,提升了系统的性能。

2 二次雷达系统组成

单脉冲二次雷达系统^[3]主要由询问/应答系统组成,询问系统包含询问天线、询问机主机、后端航迹处理、显示控制设备等,如图 1 所示。询问机主机由信道和信号处理终端组成,完成目标识别功能,将识别结果传送给航迹处理器和显示设备。

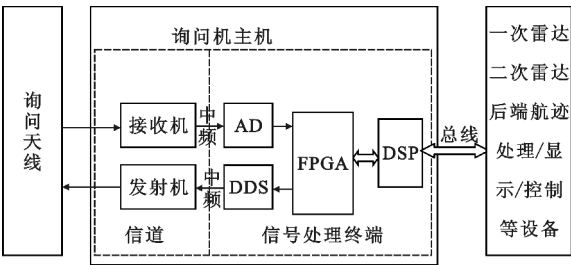


图 1 询问机组组成框图
Fig.1 Block diagram of interrogator

信号处理终端在完成目标识别的过程中,主要由 FPGA 实现数据解调、自适应门限(STC)处理、干扰(混扰和串扰)及旁瓣等应答脉冲剔除、应答脉冲信息提取等多目标处理,如图 2 所示。由于空域目标繁多造成复杂的电磁环境,为了提高系统的多目标处理能力,需要在 FPGA 内部提取应答信息前尽可能多地剔除无效的应答信息,而如何鉴定及剔除干扰脉冲则成为其关键。

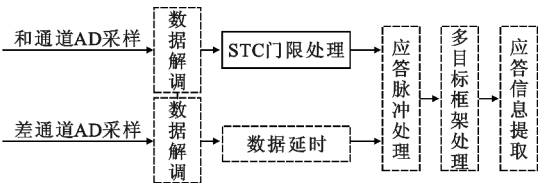


图 2 FPGA 应答信号处理
Fig.2 FPGA responding signal processing flow

3 二次雷达传统的 STC 功能

二次雷达系统中询问机接收灵敏度与其作用成正比,灵敏度表示接收机接收微弱信号的能力,灵敏度越高就表示接收机接收微弱信号的能力越强,因而通信距离就越大。在传统设计中,询问机的接收灵敏度可以通过设置信道接收机来进行手动调节,但在整个询问过程中调节后的 STC 门限保持不变,如图 3 所示。询问机接收应答信号过程中,应答目标越近,空间衰减越小,接收到的应答信号越强;应答目标越远,衰减越大,信号越弱。由于复杂的空间环境影响,询问机接收到有效应答目标的同时,通过主瓣和旁瓣接收到各种信号强度大小不一的反射和串扰目标。询问机在单次询问过程中,对应答目标个数的解码能力及解码时间是有限制的,如果先接收到的干扰目标多,将影响较远距离的有效目标的接收及解码,同时增加了后端的数据处理信息,降低了系统的目标处理能力和效率。

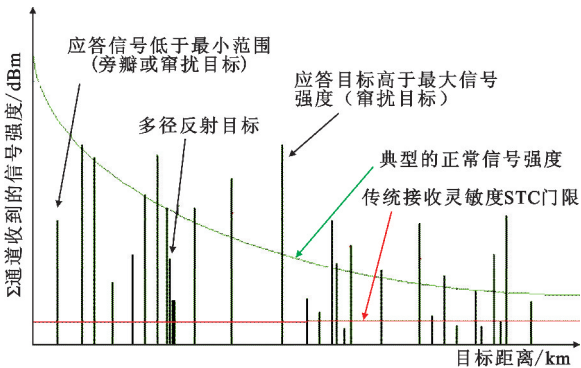


图 3 询问机接收的应答目标信号强度曲线
Fig.3 Reply signal strength curve of interrogator

通过这种调节接收机接收灵敏度的方法,虽然接收机灵敏度降低减少了接收的干扰信号(弱信号),但其效果也比较有限,而且降低了询问机作用距离的同时无法剔除对于信号强度高于接收灵敏度的串扰和多径等干扰信号,同时对于在 S 模式和模式 4 等应答延时长的工作模式下,传统的 STC 设计也无法应用。此外,可以手动调节接收机灵敏度的方法也增加了询问机信道分机的设计难度和成本。

4 数字 STC 处理的设计原理和实现方法

针对西方体制 Mark XII 中应答机各种模式有固定应答延时的特点,本文提出一种接收灵敏度随应答目标距离的远近(信号空间传播时间)而变化的新方法,即数字 STC。询问机启动询问后,信号处理终端在 FPGA 内部根据询问模式判断应答机的固

定应答延时,扣除该应答延时后根据时间实时计算接收到应答机的有效应答信号幅度(理论值),同时根据该幅度信息计算一个最大幅度值和最小幅度值(需考虑应答机发射功率的标准范围),作为该询问机的 STC 门限,如图 4 所示,FPGA 在门限比较时,将和通道接收到高于 STC 门限最大值和低于 STC 门限最小值的应答信息脉冲判为干扰目标脉冲,直接剔除,只保留 STC 门限范围内的有效脉冲,再进行后续处理。

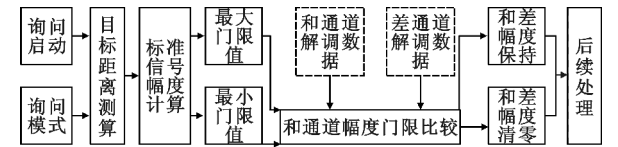


图 4 STC 门限处理
Fig. 4 STC Threshold processing

如图 5 所示,通过 STC 门限处理能将绝大部分窜扰和多径反射造成的干扰目标信息脉冲剔除,极大地减少了后端的处理脉冲数据。

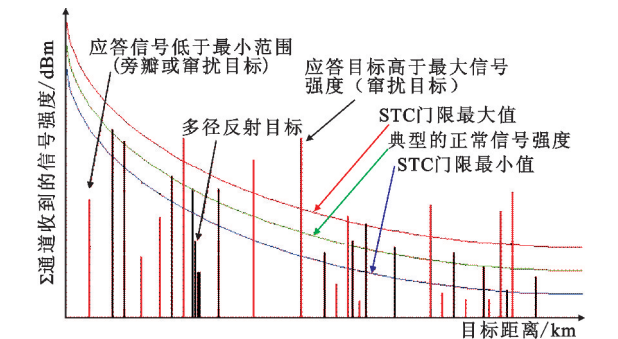


图 5 STC 门限曲线图
Fig. 5 STC threshold curve

5 STC 计算

询问机计算 STC 门限值的方法是,首先计算各距离标准的正常应答信号强度,根据询问机接收应答目标信息时间计算目标距离,公式为

$$R=(T-T_d)C/2。$$
 (1)

式中, T 为询问机发射询问脉冲到接收到应答信号的时间; T_d 为应答机的标准应答延时,模式 1、2、3/A、C 的应答延时为 $3\pm0.5\text{ }\mu\text{s}$,模式 4 的应答延时为 $202+4N(N=0,1,2,\cdots,15)\text{ }\mu\text{s}$ ^[4],模式 S 的应答延时为 $128\text{ }\mu\text{s}$; C 为电磁波在空间的传播速度。

询问机的发射功率^[5]与应答机的接收范围成正比,询问机的接收灵敏度与询问机的接收范围成正比,根据二次雷达作用距离公式可以计算应答机

处于不同距离时询问机接收到应答信号的强度,公式为

$$P_i-G_i+L_i+L_{\Sigma}=P_r+G_r-L_r-20\lg(\frac{4\pi R_{\max}}{\lambda_r})。$$
 (2)

式中, P_i 为询问机主机射频输入口接收到应答信号的强度(dBW); G_i 为询问天线增益(dB); L_r 为询问机询问主机到询问天线间的射频电缆损耗(dB); L_{Σ} 为询问天线对不准损耗、对流层吸收损耗及余量之和,一般按 2 dB 计算; P_r 为应答机射频输出端的发射功率(dBW); G_r 为应答天线增益(dB); L_r 为应答机主机到应答天线的射频电缆损耗(dB); R 为应答机与询问机间距离(m); λ_r 为应答信号波长,应答频率为 1090 MHz,即为 0.275 m。在国际民航组织(ICAO)附件 10 中规定,低空应答机(高度低于 4750 m)天线端口的发射功率为 18.5~27 dBW,高空应答机标(高度高于 4750 m)天线端口的发射功率为 21~27 dBW^[6],应答天线为全向天线,增益为 0 dB, $P_r+G_r-L_r$ 的范围为 18.5~27 dBW。根据公式计算可得各距离点询问机天线端接收到应答信号的强度,如表 1 所示,当应答机距离询问机 0.5 km 时,询问机天线端接收到最小信号为 -38.7 dBm,最大信号强度为 -30.7 dBm。根据表 1,我们可以设置 FPGA 的 STC 处理门限,门限值为天线端接收到信号的强度加上询问天线的增益再减去询问机主机到天线的电缆衰减,同时考虑几 dB 的容差。对应不同的询问天线其询问机的 STC 门限值不一样,实际应用中可以通过实时计算每个距离点所对应的幅度值得到 STC 门限值。根据公式(2)计算得到距离每增加 1 倍,信号强度衰减 6 dB。所以一般情况下我们根据最大作用距离提前分段计算各段距离的 STC 值,处理时通过查表的方式得到数据以降低计算量。

表 1 询问机天线端信号强度与距离对应值
Table 1 Signal strength of interrogator antenna and corresponding operation range

距离/km	信号强度	
	$P_{\min}/\text{dBm}$	$P_{\max}/\text{dBm}$
0.5	-38.7	-30.7
1.0	-44.7	-36.7
2.0	-50.7	-42.7
4.0	-56.7	-48.7
8.0	-62.7	-54.7
16.0	-68.7	-60.7
32.0	-74.7	-66.7
64.0	-82.7	-72.7
128.0	-90.7	-78.7

6 数据采集

图 6 为询问机在无线实验外场实际工作中,FP-GA 通过 Chipscope 得到的 AD 对接收应答信号的采样数据,图中蓝色为和通道信号,红色为差通道信号,绿色为 STC 门限。在询问主瓣内,和通道信号幅度大于差通道,在主瓣接收到正常应答信号的同时,通过旁瓣接收到了一组近距离反射信号(多径干扰信号),之后,主瓣又接收到一组异步串扰应答信号,该信号如果按传统的信号处理方法无法剔除,被判为有效应答,只能通过后期的数据融合目标凝聚来剔除。而我们通过自适应数字 STC 处理时,通过和通道脉冲幅度门限比较就可以直接剔除,将和通道幅度与 STC 门限比较,将小于门限最小值和高于门限最大值的幅度直接剔除(和差幅度同时设为 0),只保留了信号幅度在门限内的应答信号脉冲,如图 7 所示,这样极大地减少了后端的脉冲框架判断信息提取及多目标处理的数据量,提高了询问机的处理能力和处理效率。

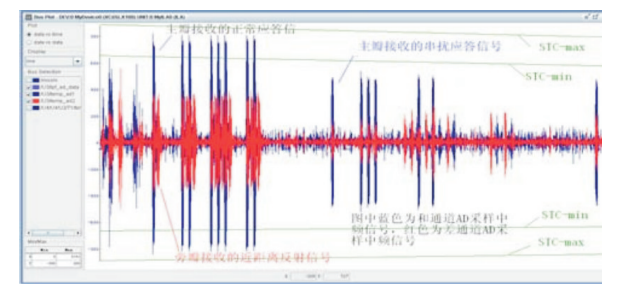


图 6 Chipscope 采样 STC 门限处理前

Fig. 6 Chipscope sampling before STC threshold processing

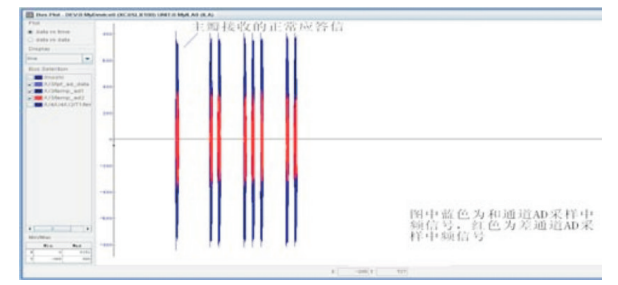


图 7 Chipscope 采样 STC 门限处理后

Fig. 6 Chipscope sampling after STC threshold processing

当询问机天线架设的位置周围有建筑物形成反射面的话,极易形成虚警目标,而且该虚警目标在后端数据融合航迹处理时也极难剔除,在实际工程中,通过数字 STC 门限则能有效减少 70% 以上的虚警目标产生,极大地提升了系统的性能。

7 结束语

具有 S 模式的询问机在采用数字 STC 门限时,询问过程中会出现接收到的 ADS-B 信号低于 STC 门限丢失的情况,询问机在询问结束后正常接收,询问机接收应答信号的时间一般少于 1 ms,外场实际应用过程中验证该情况出现不会对系统造成影响。该设计已经在工程应用中实现,并通过多个项目的外场无线实验验证了其效果显著。随着 FPGA 产品资源越来越丰富,功耗越来越低,设计者可以实现更优更有效的信号处理,不断提升设备及系统更高的抗干扰能力和多目标处理效率。

参考文献:

[1] 张峰. 雷达阵地杂波测量和动态 STC 建立方法[J]. 现代雷达,2014,36(4):10-11.
ZHANG Feng. Clutter Measurement for Radar Site and Establish Method of Dynamic STC Map[J]. Modern Radar,2014,36(4):10-11. (in Chinese)

[2] 徐佳龙. 一种对海搜索雷达的增益灵敏度控制方法[J]. 现代雷达,2011,33(12):68-69.
XU Jialong. One method of Gain Sensitivity control for Naval Search Radar[J]. Modern Radar,2011,33(12):68-69. (in Chinese)

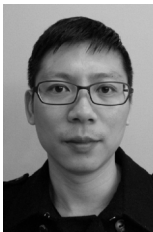
[3] 黎廷章. 空中交通管制机载应答机[M]. 北京:国防工业出版社,1992:6-16.
LI Tingzhang. The transponder of the air traffic control [M]. Beijing: National Defense Industry Press,1992:6-16. (in Chinese)

[4] DoD AIMS 03-1000A, Technical standard for the AT-CRBS/IFF/ Mark XII A Electronic Identification System and Military Implementation fo Mode S[S].

[5] Doc 9684 AN/951, Manual on the Secondary Surveillance Radar(SSR)Systems[S].

[6] Abeyratne R. The Convention on International Civil Aviation[M]. 2nd ed. Montreal, Canda; International Civil Aviation Organization,1998.

作者简介:



黄晓卿(1981—),男,浙江遂昌人,2003 年于西安电子科技大学获学士学位,现为工程师,主要研究方向为二次雷达数字信号处理。

HUANG Xiaoqing was born in Suichang, Zhejiang Province, in 1981. He received the B. S. degree from Xidian University in 2003. He is now an engineer. His research concerns digital signal processing of secondary radar systems.

Email:hjjhxq@sina.com