

MSSR 应答代码提取与置信度标注的实时算法

李玉柏 伍春 田斌
(电子科技大学通信学院 成都 610054)

摘要 该文提出了一种能在高密度应答下,有效提取单脉冲二次雷达(MSSR)应答代码,并对应答代码的置信度进行实时标注的算法。该算法不仅能够一次完成对脉冲的应答代码提取与置信度标注,并且能同时完成 OVERLAP 和 DEFRUIT 处理,保证在多应答框架出现交叠时正确区分应答和置信度判断,为目标的点迹处理提供有效报表。

关键词 MSSR, 应答代码提取, 置信度标注, 实时处理

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)06-0989-05

Real-Time Arithmetic for MSSR Reply Decoding and Confidence Bits

Li Yu-bai Wu Chun Tian Bing

(School of Telecommunication and Information Engineering, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract This paper is about Monopulse Secondary Surveillance Radar (MSSR) reply decoding and confidence bits. A novel real-time arithmetic is presented in this paper which uses new rule of garble and overlap to process defruit and to extract reply code. The experimental results show that the new arithmetic can overcome the problem of multi-target reply-blend and get better reply decoding and confidence bits on the highly density reply occasion.

Key words MSSR, Reply decoding, Confidence bits, Real-time process

1 引言

传统的二次雷达对应答信号的交迭(OVERLAP)和去异步应答(DEFRUIT)处理主要是基于滑窗法^[1]。首先通过检测间隔 20.2~20.4 μs 的位置有无脉冲对来检测框架,然后进行幻影处理,处理的方法如图 1 所示。对一串重叠的框架中所有中间的框架全部认为是幻影而丢掉,只保留第一个和最后一个框架。然后是对代码的提取,方法是将保留的真实框架中代码相应位置上有脉冲的认为其代码为 1,没有脉冲则代码为 0。最后送入一个基于应答距离(RANGE)的滑窗中,进行DEFRUIT处理。

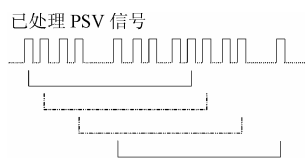


图 1 传统的应答信号去幻影处理

Fig.1 Conventional process of DEFRUIT

这种方法的主要优点有: (1) 能准确确定每个应答脉冲的位置; (2) 在低密度应答中能准确检测到可能存在的框架; (3) 方法简单,在中低密度下能去除大多数的 Fruit 干扰。但是,滑窗法由于其本身的原理决定了它不可避免地存在很大的缺陷,主要有: (1) 在应答交叠数超过 2 的时候,最多只能同时处理两架飞机,就是说在高密度应答情况下检测概率低; (2) 在幻影较多、FRUIT 干扰严重的情况下,检测概率低且容易出现误判。(3) 在应答交叠时,不能准确提取代码。

二次雷达主要应用在民用航空管理和军用敌我识别,这两个领域都需要尽可能地对应答的飞机数目及其编码内容做出正确判定,并且随着飞行物密度的增大,高密度应答处理变得非常重要。由以上分析可知,仅仅基于滑窗法对应答飞机的架次和编码内容的判定存在很大的缺陷,不能适合高密度应答处理。

解决高密度应答问题的一个重要技术就是基于单脉冲技术的二次雷达(Monopulse SSR, MSSR)处理技术, MSSR 能提供目标的偏视轴角(OBA)信号,因此能在单次应答中得到准确的方位信息,这为对应答信号的 OVERLAP 和 DEFRUIT 处理提供了新的依据^[2,3]。为此,我们设计了一种对 MSSR 应答信号进行处理的 DSP 实现方案,并给出了一种实时处理的算法,能够在高密度应答中有效地筛选真实应答,去除幻影和 FRUIT 干扰,并且在应答交叠时有效地分辨脉冲属于哪个应答。

2 MSSR 实时处理的算法原理

在描述算法之前,先作如下定义:

定义 1 F_1, F_2 脉冲分别指的是框架的第一个和最后一个脉冲。

定义 2 脉冲被完全重叠: 如果脉冲落在另一个框架的 F_1, F_2 脉冲或是码位位置上,即另一个框架的 F_1 后 $n \times 24 \pm 2$ ($n=0,1, \dots, 14$) 的位置上(系统时钟选 16.552MHz),就认为该脉冲被“完全重叠”。

定义 3 框架相交: 如果一个框架的 F_1 或 F_2 脉冲的距离

值在另一个框架的 F_1 的距离至 F_2 的距离之间,则两框架相交。

定义 4 构成交叠关系的框架:如果在两个框架中可以分别找到一个脉冲两个脉冲的相对位置满足关系式 $n \times 24 \pm 2$ ($n=0,1,\dots,14$),那么这两个框架叫做构成交叠关系的框架。

定义 5 Σ (AMP), Δ 值:分别指的是每一个脉冲的和信道、差信道的幅值大小。

定义 6 OBA,就是每个应答脉冲的偏视轴角信号,为应答脉冲的 Σ 参考信号减去 Δ 参考信号乘上一个常数:OBA = $\Sigma - \alpha\Delta$ 。其中 α 为和差两路校正的系数。

定义 7 一致性:当两个值的差小于预先设定的某一个门限,就认为这两个值具有一致性。

定义 8 脉冲的距离值:指距离计数器对该脉冲进行距离计数得到的值。

定义 9 框架的距离值:指距离计数器对该框架的 F_1 进行距离计数得到的值。

定义 10 参考脉冲信号:在分析代码的置信度时,作为一个框架的标准脉冲信号,选 F_1 脉冲或 F_2 脉冲。

定义 11 脉冲与框架 AMP 相关/不相关:就是指该脉冲的 AMP 与该框架参考信号的 AMP 具有/不具有一致性。

定义 12 脉冲与框架 OBA 相关/不相关:就是指该脉冲的 OBA 与该框架参考信号的 AMP 具有/不具有一致性。

定义 13 框架的平均 AMP, OBA:指的是一个框架所有 H1 脉冲的 AMP、OBA 的算术平均值。

2.1 去幻影

MSSR 实时处理算法中去除幻影的基本思路,是利用单脉冲二次雷达的和(Σ)、差(Δ)信道的信号幅度信息来去除幻影框架。属于同一框架脉冲的 AMP 值应具有一致性,不具有 AMP 一致性的两个脉冲很可能是属于不同的框架。去幻影采用下面的步骤:

第 1 步 可能的幻影框架判定步骤 根据完全重叠的定义,对所有收到框架中的 F_1 和 F_2 脉冲进行完全重叠判定,通过判断该 F_1, F_2 脉冲是否在另一个框架的 F_1 后 $n \times 24 \pm 3$ ($n=0,1,\dots,14$)的位置上(系统时钟选 16.552MHz时),就是通过计算两个脉冲的距离值的差,如果等于 $n \times 24 \pm 3$ ($n=0,1,\dots,14$),即为可能的幻影框架;

第 2 步 构成交叠关系的框架步骤 根据“构成交叠关系的框架”的定义,对于上步找到的 n 个可能的幻影框架,找出与每个框架 $A_i(1 \leq i \leq n)$ 构成交叠关系的所有框架 B ,即计算两个框架距离值的差,如果等于 $n \times 24 \pm 3$ ($n=0,1,\dots,14$),就是构成交叠关系的框架,假定有 m 个;

第 3 步 去幻影步骤 根据判定幻影框架充分必要条件中的“ Σ, Δ 值均具有一致性”的原则,分别计算出每一个可能幻影框架 $A_i(1 \leq i \leq n)$ 的参考信号的 Σ 值跟每个与之构成交叠关系的框架 $B_j(1 \leq j \leq m)$ 的参考信号的 Σ 值之差,同时也计算出两者的 Δ 值之差,只要其中有一组的 Σ 值之差具有一致性且 Δ 值之差也具有一致性,就将该框架作为幻影删除。

2.2 去异步应答

去异步应答处理在去幻影完成之后进行,继承传统的滑动窗法处理思路,但是对其中的判定准则进行了调整,由于去幻影部分采用的标准从严(门限较窄),有一部分幻影框架没有去除掉。因此,在该部分处理中,标准将适当放宽(门限较宽),保证能够尽可能地去除干扰。处理方法如下。

第 1 步 保存信息步骤 保存最近 N 次收到的应答的信息,其中 $3 \leq N \leq 7$;

第 2 步 距离值比较步骤 将当前要处理的每个框架的距离值与前面 $N-1$ 次应答的各个框架的距离值进行比较;

第 3 步 去除步骤 如果能够找到有 $\lfloor N/2 \rfloor + 1$ 个或 $\lfloor N/2 \rfloor + 1$ 个以上的框架的距离值与当前处理的框架的距离值具有一致性,就将该应答框架保留;反之就作为 FRUIT 干扰或前面没有去除掉的幻影将之去除,其中符号 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示对该符号内的数下取整。

2.3 代码提取和置信度分析

所谓应答代码提取就是指确定每架飞机应答的代码值。所谓置信度分析是对每个二次雷达应答信号脉冲进行归属判断,给出每一个脉冲属于某一个框架的可能性(高或低)。已有的技术文献在置信度分析方面的研究主要限于对 4 种置信度情况(H0, H1, L0, L1)判定原则的讨论和研究。目前大多数文献认为采用以下判断准则是合适的:

H1: 脉冲只与本框架相关,与其他框架都无关;

L1: 脉冲与本框架相关,与其他框架也有相关;或者,脉冲与本框架无关,与其他框架也都无关;

L0: 脉冲与本框架无关,与其他框架有相关;

H0: 其它情况。

但是,采用何种算法实现以上准则,在目前国内外的参考文献中还没有详细的说明。本设计中采用的判决方法是 AMP 和 OBA 联合判定,即使用上述判决方法分别根据 AMP 和 OBA 进行判决,得两组判决结果,再根据表 1 进行联合判定。

表 1 应答脉冲的联合置信度分析

Tab.1 Combined confidence analysis for reply pulse

由 OBA 信号决定的	由 AMP 信号决定的			
	H0	L0	L1	H1
H0	H0			
L0	H0	L0	L1	H1
L1	H0	L0	L1	H1
H1	L0	L0	H1	H1

3 代码提取和置信度分析算法具体实现

根据上述的代码提取和置信度分析算法,我们设计了基于 DSP 的实时处理具体实现。由如下 3 个步骤组成。

第 1 步 生成每个脉冲的相关信息表 Pulse_table 该表包含如下后面几轮处理必需的信息:该脉冲在框架中的位置,与框架的幅度相关性,与框架的 OBA 相关性及框架代

码。其中“框架代码”为已知，“幅度相关性”和“OBA相关性”判定的方法是：将脉冲幅度和 OBA 值分别与框架参考幅度和 OBA 值进行比对，如果具有一致性，就相关，反之不相关。“脉冲在框架中的位置”的计算方法是：计算该脉冲的距离值与 F1 脉冲的距离值之差，然后再除以 24(时钟频率为 16.552MHz 时)所得的余数即是“脉冲在框架中的位置”。

第 2 步 根据第 1 步处理获得的信息计算出每个脉冲对应其所属框架的置信度 方法是：查询第 1 步生成的每个脉冲相关信息表中的 AMP 相关信息，如果该脉冲只与该框架相关，则根据前面指出的判断准则判为 H1；如果不与本框架相关但是与另一框架相关，判为 L0；如果同时与多个框架相关，判为 L1；其余情况判为 H0。同理，再查询第 1 步生成的每个脉冲相关信息表中的 OBA 相关信息，根据相同的准则进行判定。最后，对于一个脉冲的最终置信度，采用表 1 给出的 AMP 和 OBA 联合判断法予以确定。

第 3 步 利用第 1 步处理所得的 Pulse_table 表来确定每一个应答的编码值 确定编码内容的方法是：根据第 1 步生成的脉冲信息表中的“脉冲在框架中的位置”可以直接确定各码位上的码字是 0 或 1。

在 DSP 芯片 TMS320VC5409 上实现该算法时，还必须根据算法需求和 DSP 的寻址特点来组织合理的数据结构，根

据系统对实时性的要求，程序代码的编写要尽量考虑减小运算量，可以适当增加代码量和数据缓存区。从 DSP 整个的处理系统来考虑，在减小整个程序的运算量的前提下，该算法模块也要与其它的模块融合在一起，并行完成。下面给出该算法模块在 C5409 上实现的具体细则，本处理模块还同时完成 AMP，OBA 平均值的计算和目标报表的组织。

处理模块的最终功能是根据 MSSR 前期处理得到的 frame 表(表 2)和 pulse 表(表 3)的信息，完成代码提取和置信度标注、AMP 和 OBA 平均值的计算处理，得到最初的目标报表 frame_table 表(表 4)。表 2 和表 3 的数据一般由 MSSR 的视频基带预处理完成，包括视频信号(PSV)的分解、框架检测和滤波^[4-6]。

整个处理过程分为预处理和接下来的 4 轮处理，如图 2 所示，处理中将产生 3 个临时数据信息表格：pulse_table、1frame_table_plus 和，frame_AMP_OBA_table。

3.1 预处理

将表格 frame_table，pulse_table，frame_table_plus，frame_AMP_OBA_table 全部清 0，接下来把 frame_table 的第 5 行全部写入 3FFh(即把框架内的所有脉冲标为 H0，没有脉冲的时候，全是高置信度的 0)。

3.2 第 1 轮处理

在第 1 轮处理中，主要是生成每个脉冲的相关信息表

表 2 框架信息(frame)表

Tab.2 Reply frame table

0(1bit)			框架的方位信息(15bit)				
Res(9bit)	SPI	EMER	MODC2	MODC1	MODC0	BI	SIGN
F1 脉冲的距离值							
F1 的 OBA 值			F1 的 AMP 值				
F2 脉冲的距离值							
F2 的 OBA 值			F2 的 AMP 值				
本次应答的编码内容							

表 3 脉冲信息(pulse)表

Tab.3 Pulses information table

脉冲的距离值	
脉冲的 OBA 值	脉冲的 AMP 值

表 4 MSSR 应答处理输出报表数据格式

Tab.4 MSSR reply output format

BIT15	BIT14	BIT13	BIT12	BIT11	BIT10	BIT9	BIT8	BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	MODC2	MODC1	MODC0
1	0	方位脉冲计数值(0~4096, 或 0~16384)													
16 位距离计数值(以 120.8ns 计数)															
0	模式	EMER	SPI	A4	A2	A1	B4	B2	B1	C4	C2	C1	D4	D2	D1
0	0	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
										8 位 AMP 信号					
										8 位 DELTA 信息					
														BI	SIGN

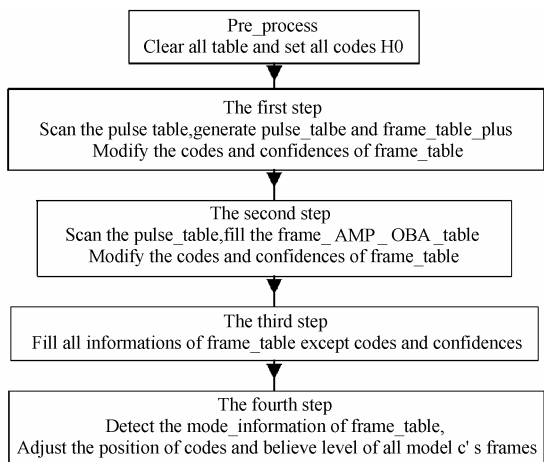


图2 代码提取和置信度标注,目标报表模块处理流程

Fig.2 The process flow chart of codes extracting, confidences analysis —Pules_table, 处理流程如图3所示。当一个应答脉冲属于某个框架,并与该框架的参考AMP相关时,根据上面的判决标准,则该码可能为H1或L1,这两种情况的代码均为1,所以这里先将代码置为1。然后,在第2轮处理中再判断是H1还是L1,得到该应答脉冲的置信度。

第1轮处理的描述:依次从pulse表取出1个pulse的range,对每一个pulse进行后续的处理。看pulse的range值是否为零,若为零表示pulse表中的每个pulse都已经处理完了,程序就跳到第2轮处理;若pulse的range值不为零,表示这是一个有效的pulse,根据这个pulse的range值,对frame表进行一次扫描,如果这个pulse落在某个框架内,且时间完全对齐,就记录在pulse_table中,并且在frame_table_plus中相应位置记录下该pulse的AMP和OBA值(以备后续使

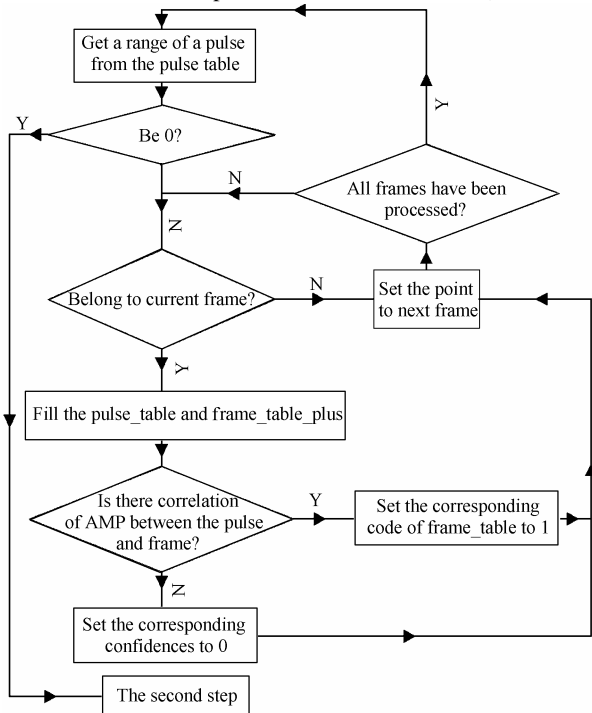


图3 代码提取和置信度分析模块第1轮处理流程图

Fig.3 The first step process flow chart of codes extracting and confidences analysis

用)。

pulse_table的结构见表5,每个pulse将生成4个word的表格,m个pulse生成的表格大小为4m。每个pulse最多同时落在4个框架内(即最多允许4个框架出现完全交叠和混淆),所以4个word为一组。当脉冲落在框架的 F_1 或 F_2 的位置时,向pulse_table相应的位置写入00FFh。(后续判断为00FF时不处理)

Frame_count: 脉冲落在哪个框架内;

OBA_correlate: 脉冲是否和框架OBA相关,1表示相关;

AMP_correlate: 脉冲是否和框架AMP相关,1表示相关;

Bit_position: 脉冲落在框架的哪个bit位置上;

Res: 保留。

3.3 第2轮处理

第2轮处理的流程图如图4所示,其作用是对第1轮处理后得到的代码和置信度进行进一步的修正,修正的原则是根据4种置信度情况(H0, H1, L0, L1)的判定原则和联合判决表。具体分析如下:

在第1轮处理中,当1个脉冲与某个框架AMP相关时,根据上面的判决标准,则该码可能为H1或L1。这两种情况的代码均为1,所以这里先将代码置为1,在第2轮处理中再判断是H1还是L1。在第2轮处理的流程图中可以看到,如果与其他的AMP无关,根据判决标准,判为H1;如果与其他有AMP相关,则暂判为L1,这时需根据OBA的信息再判断,若与自己OBA相关,则判H1,若与自己OBA无关,则判L1(修改响应的置信度为0)。

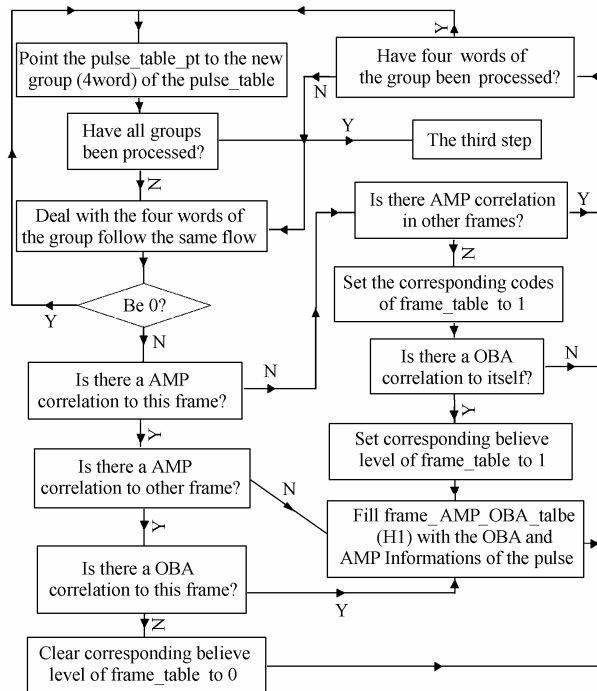


图4 代码提取和置信度分析模块第2轮处理流程图

Fig.4 The second step process flow chart of codes extracting and confidences analysis

表 5 脉冲相关信息(pulse_table)表
Tab.5 Pulse correlation information(pulse_table) table

Bit15-Bit12	Bit11-Bit8	Bit7	Bit6	Bit5-Bit0
Res	Bit_position	AMP_correlate	OBA_correlate	Frame_count

在第 1 轮处理中,当 1 个脉冲与某个框架 AMP 无关时,根据上面的判决标准,则该码可能为 L0 或 L1。这两种情况的置信度均为 0,所以这里先将置信度置为 0,在第 2 轮处理中再判断是 L0 还是 L1。在第 2 轮处理的流程图中可以看到,如果与其他的 AMP 有相关,根据判决标准,判为 L0;如果与其他 AMP 无关,则暂判为 L1(修改相应的代码为 1)。这时需根据 OBA 的信息再判断,若与自己 OBA 相关,则判 H1(修改相应的置信度为 1);若与自己 OBA 无关,则判 L1。

本处理算法在应用代码置信度的判决准则时并没有直接对 AMP 和 OBA 分别进行判决后再联合判决,而是根据实际情况主要使用 AMP 来对置信度判决,很多情况下就可以正确判决,当不能判定的时候,再使用 OBA 的信息来辅助判决。这样,在大部分的情况下都可以减少近一半的运算量,便于系统的实时处理。

在第 2 轮处理中还要为计算 AMP, OBA 的平均值作准备,生成一个 frame_amp_obo_table,其结构如表 6 所示。

表 6 frame_amp_obo_table 的结构
Tab.6 Format of frame_amp_obo_table

当前框架内 H1 脉冲的 AMP 的和
H1 脉冲的个数
当前框架内 H1 脉冲的 OBA 的和
F1 或 F2 的 AMP 和 OBA

frame_amp_obo_table 的大小为 $4n$,在第二轮的处理中,每次产生一个 H1 时,就把该脉冲的 AMP 和 OBA 信息记录在 frame_amp_obo_table 中。

3.4 第 3 轮处理

第 3 轮处理的作用是完成目标报表的组织。程序要完成填写 frame_table 中除了代码和置信度以外的所有信息,包括模式信息,方位计数信息,距离计数信息,EMER, SPI, BI, SIGN, AMP 的平均值, OBA 的平均值。其中 AMP 的平均值和 OBA 的平均值可使用第 2 轮处理产生的 frame_amp_obo_table 中的值来求出。当一个框架内所有的码没有 H1 时,AMP 的平均值和 OBA 的平均值就使用 F1 或 F2 的 AMP 和 OBA 值。

3.5 第 4 轮处理

在模式 C 的情况下,其代码信息表示飞机的飞行高度,其排列情况和其它模式不同,因此要对模式 C 的代码排列作必要的调整。第 4 轮处理的作用就是完成对模式 C 的代码位置调整。

至此,应答代码提取和置信度标注、目标报表组织处理完成。

4 结束语

基于以上算法和实时实现的步骤,我们设计了一个

MSSR 应答拾取器,并应用于某型号雷达中,取得了良好的实验效果。经用户方的试用和同行专家的测试,本论文设计的代码置信度分析与标注算法具有如下特点。

(1)本文给出的应答代码提取和置信度标注的方法,能在高密度询问的情况下进行有效的处理。能够区分一次询问的不同应答框架的码脉冲,即使在框架重叠严重的时候,仍然能够提取出属于该框架内的脉冲(指示为 H1);提取出属于该框架码脉冲位置上的、但极可能不属于该框架的脉冲(指示为 L0);提取出属于该框架码脉冲位置上的、但极可能是干扰脉冲或完全混淆脉冲(指示为 L1)等,与现有的其它应答脉冲码值分析和置信度标注的方法相比,能提供更准确的解码信息。

(2)本算法采用分层处理,处理效率高,便于实时实现。并且本处理算法基于有效的特征参数,采用联合置信度分析的判据,处理思路清晰简单,运算量不大,采用 DSP 芯片很容易实现实时运算。

(3)自适应能力强。本算法和实时处理方法具有较好的通用性和灵活性。算法在很多地方使用到门限处理,在不同的门限下的检测概率和虚警概率有变化,在应用于不同的实际工作环境中时能够根据结果实时地调整门限值,达到系统的最佳设置。

参考文献

- [1] Stevens M C. Secondary Surveillance Radar, London: Artech House, Inc, 1988.
- [2] K. McGrane. Analysis and design optimization of monopulse receivers for secondary surveillance radar, *IEEE Trans.on Aerospace and Electronic Systems*, 1991, 27(5): 838-852.
- [3] McDevitt A J. A tracker for monopulse SSR, *IEE Colloquium on State Estimation in Aerospace and Tracking Applications*, London, 14 Dec., 1989: 8/1-8/3.
- [4] 伍春. 二次雷达应答信号处理器中 DSP 的算法设计与实现. [硕士论文], 成都: 电子科技大学, 2004.
- [5] 陈建华, 张榆锋等. 二次雷达目标信息处理中的滤波器研究. *昆明理工大学学报*, 1999, 24(6): 39-41.
- [6] 钟睿, 毛士艺等. 基于 DSP-FPGA 的二次雷达信号处理机的实现. *系统工程与电子技术*, 2002, 24(1): 8-11.

李玉柏: 男, 1965 年生, 教授, 从事实时信号处理、雷达信号处理、并行处理等方面的教研工作。

伍春: 男, 1978 年生, 研究生, 从事数字信号处理、DSP 实现等方面的研究。

田斌: 男, 1982 年生, 研究生, 从事 DSP 技术与应用方面的研究。