

文章编号:1001-893X(2012)06-0840-06

S 模式地面二次监视雷达及其关键技术分析*

兰 鹏¹, 曾一江², 王 凌³

(1. 中国西南电子技术研究所, 成都 610036; 2. 成都工业学院 电气与电子工程系, 成都 611730;
3. 海军装备部重庆局, 重庆 400043)

摘 要:介绍了 S 模式地面二次监视雷达的组成和工作原理, 结合实际情况与工程经验提出了实现 S 模式二次监视雷达的关键技术, 并逐一进行了论述, 最后提出了我国空管监视技术从 A/C 模式过渡到 S 模式的建议。

关键词:二次监视雷达; S 模式; 数据链; GDLP; ADLP; 单脉冲技术

中图分类号: TN958.96 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.06.002

Ground Mode S Secondary Surveillance Radar and its Key Techniques Analysis

LAN Peng¹, ZENG Yi-jiang², WANG Ling³

(1. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China;

2. Department of Electrical and Electronic Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu 611730, China;

3. Chongqing Military Representative Bureau of Navy Equipment Department, Chongqing 400043, China)

Abstract: The composition and principle of ground Mode S SSR (Secondary Surveillance Radar) are introduced. Key techniques to implement Mode S SSR are put forward and discussed, according to authors' practical work experience. Finally, some suggestions for developing China's air traffic surveillance technology from A/C Mode to Mode S are given.

Key words: SSR; mode S; datalink; GDLP; ADLP; monopulse technique

1 引 言

S 模式是近年发展起来的一种新的空中交通监视技术, 相对传统的 A/C 模式二次监视雷达, 采用了选址询问, 扩展了数据链, 扩充了系统容量, 降低了系统内部干扰, 因而在美、欧等国家和地区得到了广泛应用, 同时也是国际民航组织推荐使用的一种空管模式。而我国空管发展比较缓慢, 目前还普遍使用的是 A/C 模式, 但随着空中交通的发展, 飞机密度的增加, 势必也会向 S 模式监视系统发展。正因为我国目前还没有采用 S 模式, 因而有关 S 模式的系列标准也没有颁布, 系统性论述的相关文献也

很少。有些文献认为, 通过对传统 A/C 模式二次监视雷达进行简单的升级就可以实现 S 模式, 笔者认为 S 模式除了在工作频点上与传统的 A/C 模式相同外, 是完全不同的两个系统, 特别是 S 模式的数据链功能, 以及地面站的协同功能, 使得 S 模式的控制相当复杂; 同时, S 模式地面二次监视雷达是一个逐步更换的过程, 在实施过程中, S 模式二次监视雷达必须考虑兼容现有的传统的 A/C 模式, 因而 S 模式二次监视雷达必须经过全面细致的设计才可能充分发挥 S 模式的效能。

本文主要针对实现地面二次监视雷达的关键技术进行论述。

* 收稿日期: 2012-02-20; 修回日期: 2011-04-17

2 S 模式二次监视雷达系统简述

S 模式二次监视雷达系统是在传统的 A/C 基础上发展起来的,也是采用询问应答协同的工作方式,因而 S 模式二次监视雷达系统包括具有 S 模式能力的地面二次雷达询问机和机载应答机两部分。国际民航组织为每架飞机分配了一个唯一地址(24 位地址)^[1],地面站可以对飞机进行选址询问,询问发射频率为1 030 MHz,接收频率为1 090 MHz,询问上行信号如图 1 所示,前 2 个脉冲为同步脉冲,P5 为询问旁瓣抑制脉冲,P6 为信息脉冲,采用 DPSK 调制,信息位长56 bit或112 bit,56 bit称为短信号格式,主要用于监视,112 bit称为长信号格式,除用于监视外还需要传输数据信息,也就是数据链功能都采用长信号格式,其码速率为4 MHz。应答下行信号如图 2 所示,前 4 个脉冲是同步脉冲,后面 56 个脉冲或 112 个脉冲也分为长格式和短格式,采用脉位调制,码速率为1 MHz。

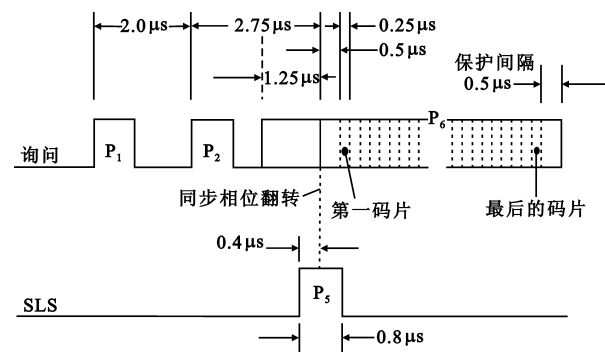


图 1 询问上行格式
Fig.1 Uplink format of interrogation

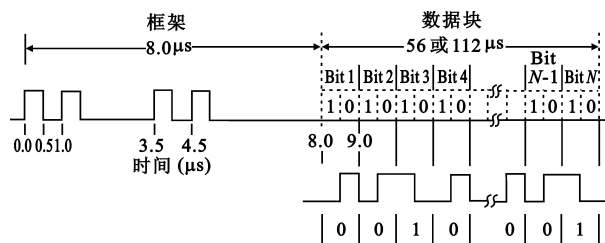


图 2 应答下行格式
Fig.2 Downlink format of reply

国际民航组织(ICAO)附件 10 中分别对上行和下行定义了 S 模式的 24 种格式,其中上行格式 4、5、11、20、21、24 用于二次监视雷达监视系统,0 和 16 号格式用于 ACAS 系统,为以后扩展保留了 17 种格式;下行格式中,4、5、11、20、21、24 用于二次雷达监

视系统,0 和 16 号格式用于 ACAS 系统,17、18、19 号格式用于 ADS-B,其中 19 号格式为军用。在二次监视雷达使用的几种格式中,11 号格式是全呼询问和应答,主要用于对空中目标的捕获,以获取空中目标的 S 模式地址,4 号和 5 号格式主要用于监视,以替代传统的 A/C 模式,4 号格式传输高度信息,5 号格式传输编号信息,20、21 号格式主要用于数据传输,同时具有监视功能,24 号格式主要用于扩展通信功能。在 S 模式数据链的功能上主要分为通信 A、通信 B、通信 C 和通信 D 4 种,上行 20、21 号格式主要用于通信 A,下行 20、21 主要用于通信 B,上行 24 号格式用于通信 C,下行 24 号格式用于通信 D。通信 A 又分为广播通信 A 和一般通信 A,广播通信 A 用于地面站向覆盖范围内的空中目标发送广播信息,一般通信 A 用于地面站对特定的飞机发送信息;通信 B 又分为地面发起的通信 B(GICB)、空中发起的通信 B(AICB)和广播通信 B 等^[1-2]。

3 S 模式二次监视雷达组成及工作原理

S 模式地面二次监视雷达主要组成如图 3 所示,包括天线系统、发射机、接收机、信道管理器、S 模式回答处理器、A/C 模式回答处理器、航迹处理、数据管理以及接口管理等部分。

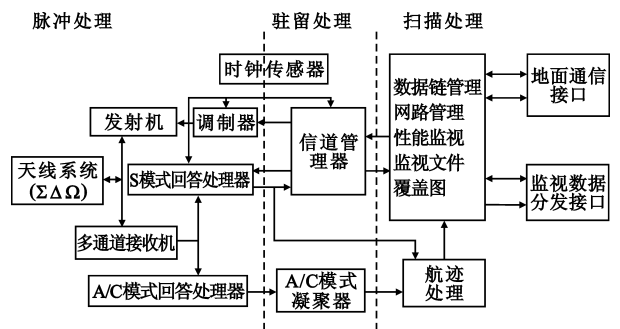


图 3 S 模式地面询问机组成框图
Fig.3 Mode S SSR composition block diagram

天线系统包括 Σ 、 Δ 、 Ω 三通道单脉冲天线,和传统 A/C 模式二次监视雷达一样,为了减少垂直反射的影响,采用大垂直孔径天线。由于 S 模式询问机需要同时发射 P6 脉冲和旁瓣抑制脉冲(P5 脉冲),发射机需采用主、辅两个发射机,主发射机发射信号脉冲和同步脉冲,辅助发射机发射旁瓣抑制脉冲,接收机采用三通道接收, Σ 、 Δ 通道接收机配合

Σ 、 Δ 单脉冲天线,实现单脉冲测角, Σ 、 Ω 实现接收旁瓣抑制功能,分别采用 S 模式和 A/C 模式两个独立的回答处理器,实时的对每次回答进行信号处理,以得到每次回答的解码值;A/C 模式凝聚器主要对驻留波束内的 A/C 模式回答进行凝聚,剔除异步干扰等;信道管理器主要对波束内要处理的 S 模式询问(包括数据传输任务)以及 A/C 模式询问进行时序上的管理;链路管理器主要完成通信任务与跟踪目标的配对、对活动列表的管理。

4 S 模式二次监视雷达关键技术

4.1 S 模式与 A/C 模式的兼容性

虽然 S 模式采用了点名询问,但在跟踪前是不知道空中目标的 S 模式地址,当 S 模式二次监视雷达工作在多站情况下,可以通过相邻地面站的引导实现对目标的跟踪,但大多情况下需要自身对目标进行捕获,只有捕获锁定后的目标才能进行点对点的数据传输。S 模式目标的捕获是采用全呼询问,跟踪和数据传输采用选址询问,锁定后的目标不再对 S 模式全呼询问进行应答,为了方便管理和减少干扰,实际实施时,采用全呼和选址询问分时进行,其时序如图 4 所示,包括一个全呼询问周期跟一个轮询周期,在轮询周期内实现选址询问。

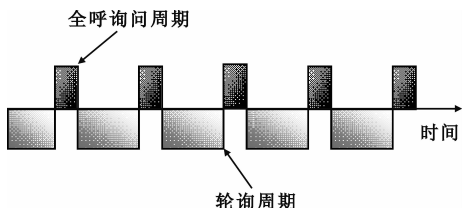


图 4 S 模式二次监视雷达工作时序
Fig.4 Mode S SSR time - sharing

考虑到从传统的 A/C 模式升级到 S 模式需要一定的时间过渡,因而国际民航组织在制定 S 模式标准时,充分考虑了 A/C 模式与 S 模式的兼容问题,使得 A/C 模式二次雷达监视系统与 S 模式二次雷达监视系统可以共存。在全呼询问时,对传统的 A/C 模式信号进行了改进,增加了 P4 脉冲,如图 5 的信号格式称为组合询问信号格式,对于传统的 A/C 模式应答机只识别 P1 ~ P3 脉冲,并按识别的 P1 与 P3 的时间间隔确定询问模式,对于 S 模式应答机需要识别 P4 脉冲,P4 为宽脉冲($1.6\mu s$)时表示对所

有应答机进行全呼询问,P4 为窄脉冲($0.8\mu s$)时表示仅对 A/C 模式应答机进行询问,S 模式应答机接收到该信号不应答。但在实际使用中,人们更喜欢采用 UF11 号仅 S 模式全呼和短的组合询问格式(仅 A/C 模式回答)组成的时序对空中目标进行全呼询问,如图 6 所示,这样在同样覆盖范围内的 S 模式应答机和 A/C 模式应答机具有相同的接收时间窗,A/C 模式应答机也有足够的时间从抑制 A/C 模式(仅 S 模式全呼)中恢复。

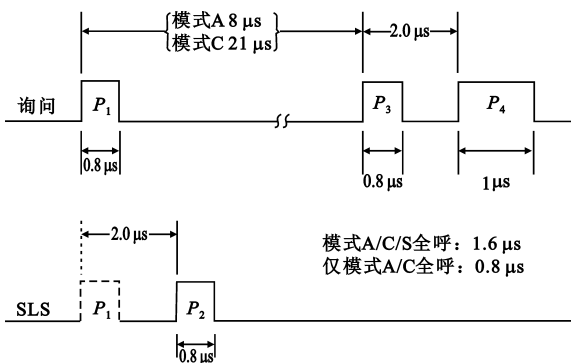


图 5 组合询问信号格式
Fig.5 Intermode interrogation format

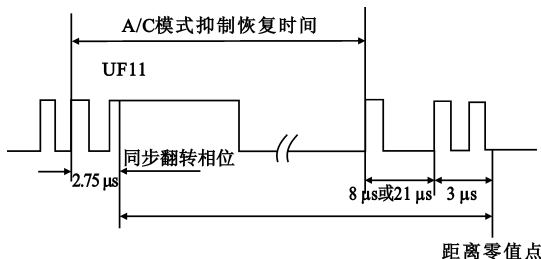


图 6 A/C 模式和 S 模式全呼组合时序
Fig.6 Combined interrogation scheduling

4.2 S 模式信道管理

由于 S 模式既要完成监视功能又要完成数据链功能,同时还要兼容传统的 A/C 模式,因而如何有序地安排和管理地面雷达在波束覆盖范围内目标的通信和监视任务显得尤为重要。S 模式地面二次监视雷达需要一个专用的信道管理器来完成这些任务,其原理主要包括信道控制、事务预处理、目标列表更新、轮询进程安排和事务更新,如图 7 所示。信道控制实时监视时钟和天线指向,保证所有 S 模式和 A/C 模式活动都发生在恰当的时间和序列(波束驻留时间),每间隔一定时间,信道控制就指示事务预处理器提供即将进入波束的飞机清单;事务预处

理查询包含目标预测位置的监视文件,如果将要进入波束的飞机有上行链路信息或下行链路信息需处理,那么事务预处理就会确定要完成这些任务所需要处理的数目和类型,事务预处理为每架飞机创建一张表单,表单包括一套要完成所有待处理的监视与通信任务所需要的完整说明;目标列表更新器组合这些表单为活动列表,并定期更新,表单上的条目是由事务预处理器所阐明的数据块。新目标中的数据块由事务预处理提供,并且被并入此列表,而那些离开波束或完成服务的目标,都会被清除。为了更好地估计一个询问与应答的非冲突时序,活动目标列表是以目标距离递减的方式进行排序。事务更新是针对具有多任务的目标,对于有多任务的目标原则上是安排连续进行,如果某项任务成功进行,就会修改目标的数据块,以安排下一任务进行;如果某项任务进行不成功,会安排在下一时序继续进行;轮询进程安排信道管理器的输出时序,其原则是基于目标的距离,最远的先问,后续安排的询问目标,其回答不会与前一询问的回答交替,如果没有足够的时间来完成一个完整的时序安排,那么就会安排到下一循环进行。图 8 是一个信道管理轮询实例,在第 1 个循环实现了对 4 架飞机的询问,在第 2 个循环实现了对 2 架飞机的询问,从该图也可以看出,合理进行信道管理可以大大提高信道的利用率。

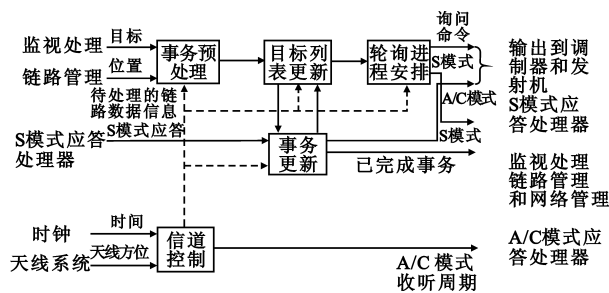


图 7 信道管理原理框图
Fig. 7 Channel management block diagram

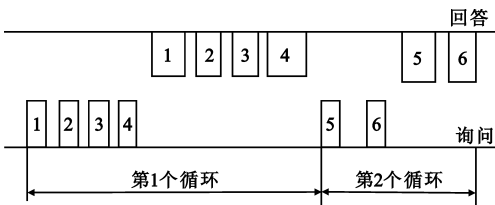


图 8 轮询实例
Fig. 8 An example of roll - call

4.3 S 模式链路管理

S 模式地面二次监视雷达为 S 模式地 - 空数据链提供物理层和部分链路层的服务,S 模式数据链功能主要包括通信 A、广播通信 A、GICB(Ground-initiated Comm-B)和 AICB(Air-initiated Comm-B)等多种形式,实现这些数据链功能需要与地面数据链处理器(GDLP)和机载数据链处理器(ADLP)配合工作,如图 9 所示。对于进入地面二次监视雷达覆盖区的空中目标,地面二次监视雷达是靠定向天线实现与指定目标的通信,对一特定的飞机,每次扫描的波束驻留时间只有几十毫秒,对于飞机密度较大的区域,如果通信任务较多,势必有些目标的通信任务不能在一次扫描完成,需要多次扫描,如何有序地实现与空中目标的通信,在天线指向目标前将具有通信任务的目标和任务种类提供给信道管理器,需要建立一个活动信息列表,这个活动信息列表是对地面二次雷达覆盖区域内的所有 S 模式目标列表,对新跟踪的目标需要及时加入活动列表,并建立与 GDLP 的链路连接,对飞出覆盖区的目标及时终止与 GDLP 的连接,并从活动信息列表中剔除,二次雷达只从 GDLP 接收在覆盖区内目标的通信任务,对活动列表中具有通信任务的目标进行长格式询问,对没有通信任务的进行监视询问(短格式询问),在活动信息列表的建立中,询问机需要将通过监视获得的目标位置信息与通过 GDLP 获得的通信任务进行配对,并分类进行管理,对未完成的通信任务进行更新。图 10 是 GICB 链路管理实例。

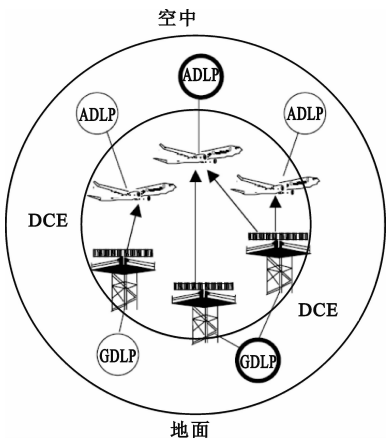


图 9 S 模式数据链功能框图
Fig. 9 Mode S datalink functional block diagram

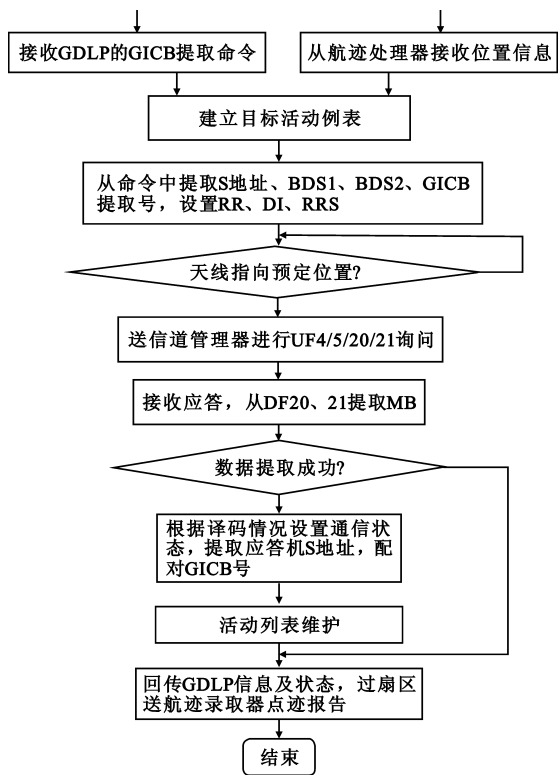


图 10 GICB 控制流程
Fig. 10 Control flow of GICB

4.4 S 模式目标的捕获

S 模式二次监视雷达主要采用选址询问方式进行工作,但这只是在建立了目标跟踪的情况下,在对目标跟踪之前,需要对目标进行捕获、锁定,以最大限度地减少系统的异步干扰。一旦被捕获,S 模式飞机对随后的 S 模式全呼叫询问进行闭锁,此闭锁条件由 S 模式地面站通过 S 模式选址询问控制,如果因任何原因致使一架飞机在 18 s 左右没有接收到地面站的闭锁命令选址询问,将自动解锁,以便普通 S 模式捕获可重新捕获飞机。

如何快速捕获 S 模式目标,可以采用多种捕获技术,包括多站捕获与闭锁、非选择性捕获与闭锁、集群询问机捕获与闭锁,以及随机捕获等多种方式。S 模式为每个具有共同覆盖区的地面询问机分配了一个询问识别符(Ⅱ码)和监视识别符(SI 码),并要求应答机能够根据Ⅱ码和 SI 码具有多站闭锁,针对不同的Ⅱ码和 SI 码锁,对应多达 78 个地面询问机的全呼捕获询问;非选择捕获与闭锁,是建立在Ⅱ=0 的基础上,与 S 模式子网协议不兼容,不能用于普通的 S 模式捕获;集群询问机捕获与闭锁,是地面使用相同询问标识符的询问机通过地面网路协调它们的监视和通信任务,不需要每个询问机都去捕获

目标;随机捕获,S 模式地面站用一个特殊全呼叫询问命令进行询问,此命令指示飞机用一个特定的小于 1 的应答概率进行应答,由此降低的应答率意味着有些全呼叫应答被正确接收,并且这些飞机将被捕获。一旦一架飞机被捕获,它就被闭锁,就不会再干扰其他尚未被捕获飞机的全呼叫应答,这一过程一直重复,直到所有的飞机被捕获,这种捕获文献[3]中已有详细介绍。

4.5 单脉冲技术

S 模式二次监视雷达要求一次询问、应答就能获得目标信息,这其中包括目标数据传输信息和监视获得的目标位置信息,而传统的滑窗技术需要多次询问才能获得理想的位置信息,很难满足 S 模式的要求,因而对于 S 模式地面询问机必须采用单脉冲技术,其原理如图 11 所示。

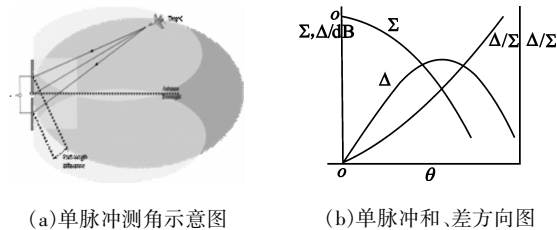


图 11 单脉冲原理框图
Fig. 11 Monopulse principle block diagram

通常二次监视雷达采用比幅单脉冲技术进行测角,根据接收到的 Σ 、 Δ 通道的脉冲的幅度值计算出 Δ/Σ ,由 Δ/Σ 与偏离天线的法向值(OBA)的关系查表得到 OBA 值,与实时采集的天线指向值相加或相减得到目标的方位角,根据 Σ 、 Δ 通道的相位超前滞后关系,判断目标在法线左边还是右边,以决定目标方位是加 OBA 值还是减 OBA 值。

此外单脉冲技术除用于测角外,也用于多目标处理。

5 S 模式二次监视雷达接口要求

S 模式二次监视雷达接口主要分为内部接口和外部接口,内部接口主要包括地面站询问机与询问天线的接口、询问机与本地控制盘的接口、询问机与维护显示器的接口,与天线的接口包括 Σ 、 Δ 、 Ω 三通道射频接口和天线指向数据,天线指向信号采用增量编码方式,一路方位脉冲,一路正北脉冲;与本地控制盘的接口主要完成本地控制盘对询问机的工作参数进行设置,并实时监视询问机的状态,采用

RS422 接口;与本地维护监视器的接口主要对目标的航迹进行监视,采用 RS422 接口或网络接口。与外部设备的接口包括与空中交通管制中心的接口、与 GDLP 的接口、与本地用户的接口、与其他邻近地面站系统工作接口,实现 S 模式数据链功能与空管中心的监视接口和 GDLP 接口是必需的,与邻近地面二次监视雷达接口在多站协同工作时需要,对外接口都采用双冗余网络接口,如图 12 所示。

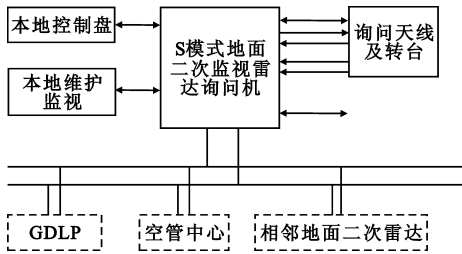


图 12 S 模式地面二次监视雷达接口框图
Fig.12 Mode S SSR interface block diagram

与空中交通管制中心接口,主要向交通管制中心传输目标点迹/航迹报文,通常采用网络接口。由于我国还没有相应标准,我们参照欧洲航空组织监视数据交换报文 CAT48《单站雷达目标发送报文》^[4]执行。

与地面数据链处理器 GDLP 的接口主要与 GDLP 进行双向数据交换,将从飞机上提取的数据发送给 GDLP,把 GDLP 传来的数据通过二次监视雷达发送给飞机,同样采用网络接口,参照欧洲航空组织监视数据交换报文 CAT18《S 模式数据交换信息》^[5]执行。

6 S 模式二次监视雷达链路计算

S 模式二次监视雷达链路计算同样遵从二次雷达的计算公式^[6]:

$$P_{\text{rec}} = P_{\text{trd}} \frac{G_A G_T}{L_{\text{at}} L_l L_T} \frac{1}{(4\pi)^2} \frac{\lambda^2}{R^2} \quad (1)$$

式中, P_{rec} 为接收机输入口的接收功率,单位 W; P_{trd} 为发射机在输出口的发射功率,单位 W; G_A 为地面二次监视雷达天线增益; G_T 为应答机天线增益; L_l 为二次监视雷达到天线之间电缆损耗和; L_i 为应答机到天线之间电缆损耗和; L_{at} 为大气衰减; λ 为波长,单位 m; R 为地面站和应答机天线之间的距离,单位 m。

在下行链路计算时,考虑到 S 模式必须采用单

脉冲技术进行测角,系统应该留有足够的余量。

7 结束语

S 模式二次监视雷达具有监视、数据链功能,相比传统的 A/C 模式具有很多优势,是国际民航空中交通监视技术的发展方向,既可以采用单站工作方式也可以采用多站地面协同工作方式,其控制流程相当复杂。国内这方面的文献很少,国际民航组织也仅仅给出了一些规范性的要求,对其实施方式并没有作详细的规定。随着我国民用航空事业的发展,空中交通密度的增加,在从传统 A/C 模式监视系统过渡到 S 模式监视系统的过程中,建议针对 S 模式二次监视雷达的具体特点,制定和完善一系列 S 模式二次监视雷达的实施标准及规范,才能逐步推行,这样才能最大发挥 S 模式的效能。

参考文献:

[1] ICAO Annex 10 Volume IV, Surveillance and Collision Avoidance Systems[S].
[2] Doc9684 An/951, Manual on the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems[S].
[3] 王亚涛. 空管二次雷达 S 模式询问机目标捕获与监视实施方案[J]. 电讯技术, 2010,50(7):71-75.
WANG Ya-tao. Target Capture and Surveillance Method for Mode S Air Traffic Control SSR Interrogator[J]. Telecommunication Engineering, 2010,50(7):71-75. (in Chinese)
[4] Eurocontrol Standard Document for Surveillance Data Exchange Part 4[S].
[5] Eurocontrol Standard Document for Surveillance Data Exchange Part 6[S].
[6] Stevens M C. Secondary Surveillance Radar[M]. New York: Artech House, 1998.

作者简介:

兰 鹏(1964—),男,四川郫县人,研究员,主要研究方向为二次雷达;

LAN Peng was born in Pixian, Sichuan Province, in 1964. He is now a senior engineer of professor. His research direction is SSR.
Email: lanp_003@163.com

曾一江(1964—),女,重庆人,副教授,主要研究方向为电子技术;

ZENG Yi-jiang was born in Chongqing, in 1964. She is now an associate professor. Her research direction is electronic technology.

王 凌(1978—),男,陕西韩城人,工程师,主要研究方向为二次雷达。

WANG Ling was born in Hancheng, Shaanxi Province, in 1978. He is now an engineer. His research direction is SSR.