

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.06.016

改进的 S 模式纠错算法^{*}

梁 丰^{**}

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:对检测到错误的 S 模式应答信号报文纠错,传统的方法是查表法,不仅效率很低,而且要求很大的存储空间存放错误图样,不适合工程应用。通过对 S 模式应答信号的干扰情况、编译码方式及循环码特性的深入研究,提出了余数计算的改进方法;再结合使用码元置信度,实现了能快速、准确定位误码并纠正它们的算法。改进的纠错算法不仅效率高,而且占用系统资源少,易于硬件实现,其有效性已得到工程应用的验证。

关键词:S 模式;应答信号;突发脉冲干扰;循环冗余校验;检错;纠错

中图分类号:TN911.72 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)06-0755-04

An Improved Algorithm for Mode S Error Correction

LIANG Feng

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

Abstract:To correct the Mode S reply message when the error is detected, the table lookup is a traditional method. But it has very low efficiency, and plenty of space is needed to store error patterns. This method is not suitable for the engineering application. Through intensively studying the interference conditions, coding of Mode S reply and the characteristic of cyclic code, an improved method of calculating remainder is presented. As a result, an algorithm is realized with which error codes can be located quickly and accurately by using the code confidence, and then be corrected. The improved algorithm not only has very high efficiency, but also takes up less system resources, and can be implemented easily in hardware. The effectiveness of improved algorithm has been verified in the engineering application.

Key words:Mode S; reply message; burst pulse interference; cyclic redundancy check; error detect; error correction

1 引 言

循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)是一种用于提高 S 模式通信质量的差错控制编码技术,这种技术在信息码元之外加入了多余的码元,这些多余的码元不载荷信息,只是用来校验信息码元在传输中是否出现差错及为纠正错误信息码元提供处理依据。根据 S 模式应答信号处理流程,接收机不仅要对接收信号报文检错,还要求对检测到错误的信号报文纠错^[1]。

CRC 是在严密的数学理论上建立起来的,其检错能力很强,实现方法也不难。为了能够纠错,

要求每个可纠正的错误样本必须与一个特定余数有一一对应关系。对只有一位错误的信息,错误图样比较少,采用查表的方式纠错还算简单;但对于不止一位错误的信息,错误图样的数量急剧增加,不仅需要大量的存储空间存放,查找也要花费大量时间。

突发脉冲对 S 模式应答信号的干扰通常不止一位,使用查表法纠错显然不适合工程应用。必须设计一种算法,通过建立余数与错误图样的某种对应关系来找出误码的确切位置。本文首先对 S 模式应答信号的主要干扰进行分析,然后对编译码及检错过程简要说明,最后详细叙述了改进的纠错算法及其实现方法。纠错的关键是对误码准确定位,这正

^{*} 收稿日期:2012-10-26;修回日期:2013-03-18 Received date:2012-10-26;Revised date:2013-03-18

^{**} 通讯作者:franvin_leung@163.com Corresponding author:franvin_leung@163.com

是算法改进的重点。纠错过程中要使用码元置信度,它携带了低置信度码元的位置信息。改进后的纠错算法已在硬件平台实现,实际使用效果很理想。

2 S 模式应答信号的主要干扰

S 模式应答信号的中心频率是1 090 MHz,单个脉冲宽度为0.5 μs,码速率为1 Mb/s。在同一空域中,存在多部应答机同时工作的情况,应答信号的频率相同,工作方式为 S 模式和空中交通管制雷达信标系统 (Air Traffic Control Radar Beacon System, ATCRBS)模式;还存在载波频率在1 090 MHz附近的 TACAN 信号。此外,应答信号的多径效应也是干扰的另一主要来源,这些信号相互叠加,形成脉冲串,属于突发性干扰,当空域中的飞机密度很小时,这些干扰不明显;但当空域中的飞机密度很大时,干扰会非常严重,尤其以 ATCRBS 模式应答信号对 S 模式应答信号的异步干扰最为严重,给接收机译码及报文使用带来很大麻烦。

3 S 模式应答信号编译码过程

对 S 模式应答信号纠错,需要研究 S 模式应答信号的编译码原理。S 模式应答信号由 4 个前导脉冲和 56 位(或 112 位)报文信息组成,报文信息的前 32 位(或 88 位)是数据块(信息码元),后 24 位是校验块(监督码元)^[2]。报文信息编码过程如图 1 所示。

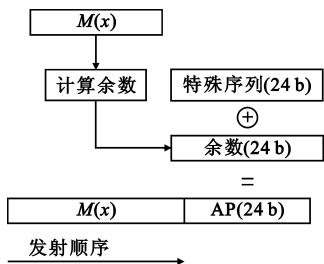


图 1 报文信息编码过程
Fig.1 The process of message coding

地面接收机对接收到的应答信号先做滤波、变频、放大等处理,然后根据脉冲幅度及位置关系进行译码。译码是编码的逆过程,正确的译码直接关系到后面的纠错能否成功,译码的同时还要对每一个码元设置置信度以用于纠错。译码后要对整个报文信息进行检错,检错计算的结果也用于纠错处理。

4 码元置信度判定

S 模式应答信号报文采用 PPM 方式,每1 b对应 1 μs时间长度。如果前0.5 μs或后0.5 μs内有脉冲幅

度(主片),则该位码元记为“1”或“0”;如果另0.5 μs(从片)内没有脉冲幅度且主片的脉冲幅度来自天线的主波束而不是旁瓣,则这位的置信度记为高(通常以“0”表示),否则记为低(通常以“1”表示)。很多方法可实现 S 模式应答信号报文译码及码元置信度判定,文献[3-4]描述了可行的算法。

5 纠错前处理

S 模式应答信号报文是一种(56,32)循环码(或(112,88)循环码),生成多项式 $G(x)$ 为 24 位。根据循环码理论^[5],将报文信息中的数据块 $M(x)$ 向左移动 24 位得到的结果可表示为

$$x^{24}M(x) = m(x)G(x) + R(x) \tag{1}$$

那么,一个完整的报文信息为

$$D(x) = x^{24}M(x) + R(x) + A(x) \tag{2}$$

式中, $A(x)$ 为特殊序列(比如询问机代码或飞机地址码)。假设在传输过程中有最大长度为 24 位的脉冲干扰:

$$E(x) = x^jF(x) = e(x)G(x) + \varepsilon(x) \tag{3}$$

式中, j 是距离数据块末尾的位数, $F(x)$ 是最高指数不大于 23 次幂的多项式。 $E(x)$ 是 $F(x)$ 左移 j 位的结果,是最高指数不大于 $23 + j$ 次幂的多项式,可得

$$\begin{aligned} \frac{D(x) + E(x)}{G(x)} &= \frac{x^{24}M(x) + R(x) + A(x) + E(x)}{G(x)} = \\ &= \frac{m(x)G(x) + R(x) + A(x) + E(x)}{G(x)} = \\ &= m(x) + e(x) + \frac{A(x)}{G(x)} + \frac{\varepsilon(x)}{G(x)} \end{aligned} \tag{4}$$

其中:

$$\frac{E(x)}{G(x)} = \frac{x^jF(x)}{G(x)} = e(x) + \frac{\varepsilon(x)}{G(x)} \tag{5}$$

在实际处理中,通常对除去(使用异或运算)特殊序列的报文计算余数 $S(x)$,则 $S(x) = \varepsilon(x)$ 。因此,如果报文信息在传输过程中没有错误,使用 CRC 计算后可以得到预期余数“0”;相反,如果没有得到预期的余数(比如还有未知余数 $\varepsilon(x)$),则说明报文信息在传输过程中已被干扰或译码有错(本文仅讨论脉冲干扰造成的错误)。

有种特殊情况,如果 $j = 0$,即干扰造成的错误只发生在报文信息的最低 24 位中。分析式(5)可知,等号左边 $E(x)$ 的最高次幂为 23,而等号右边 $G(x)$ 的最高次幂为 24,因此必须是 $e(x) = 0$ 才能保证等式成立。由此可得 $\varepsilon(x) = E(x)$,这说明计算的结果就是错误本身。

6 应答信号报文纠错

S 模式应答信号报文纠错流程如下:

- (1)判断余数 $S(x)$ 是否为零,不为零则需纠错;
- (2)找到误码的位置;
- (3)纠正误码,即误码与“1”异或;
- (4)再次进行检错计算,验证纠错是否成功,成功则输出报文信息,否则申请重发或丢弃。

由前面叙述可知,突发脉冲对 S 模式应答信号报文的干扰往往不止一位。根据循环码原理,对于 24 位的干扰,可引起 $2^{24} - 1$ 种错误,每种错误对应一个特定的余数,即存在 $2^{24} - 1$ 种错误样本。如果将对应每种错误的样本事先计算出来并存储,那么在纠错过程中就可以通过查找对应的错误样本的方法找出误码的位置。但是,这种方法占用资源多,执行效率很低,不适用于实际工程中对 S 模式应答信号报文进行纠错。

6.1 改进的纠错思路

如果对报文信息的干扰只出现在最低 24 位以内,余数 $S(x)$ 恰好与干扰 $E(x)$ 相对应,数据块则不受影响。但实际的干扰可能对报文信息的任意一段造成影响,要准确定位干扰出现的位置,除使用信息码元和余数外,还需要码元“置信度”的配合。

置信度的判定是随着译码过程进行的,它为“高”时,说明该位码元符合编码规则,译码是准确的;它为“低”时,说明该位码元具有不确定性,而不能认为该位一定有错。因此,必须具备以下两个条件的报文信息才能进行纠错:一是余数 $S(x)$ 不为零,如果余数为零,那就说明译码没有错误,即报文信息没有受到干扰,无需纠错;二是置信度必须至少有一个为低,可以纠错的码元只针对置信度为低的。如果某码元置信度为高,说明译码是准确的,因此即使检错后发现报文信息有错,也无法纠错,只能丢弃报文信息。

纠错的关键是准确对误码定位,纠错方法的改进本质上是设计一种效率更高的定位误码的算法。前面提到如果干扰只出现在报文信息的最低 24 位中,计算得到的余数就是干扰本身。既然报文信息是一种循环码,那么将它循环右移不会改变其特性,如果将误码移动到最低的 24 位中,就可以准确对其定位,处理方法如下:

- (1)将余数 $S(x)$ 与置信度序列的最低 24 位比较;
- (2)如果 $S(x)$ 中所有出现“1”的位置与置信度序列最低 24 位中所有出现“1”(低置信度)的位置一一对应,则误码即被定位,将报文中那些与 $S(x)$ 中为“1”的位置相对应的码元纠正即可;
- (3)如果不能一一对应,将报文和置信度序列循环右移一位,并对移动后的报文计算新的余数 $S(x)$;

- (4)重复步骤 1 ~ 3,直到这种一一对应关系存在,否则错误就不能得到纠正。

从定位方法可以看出,每循环移动一位后都要重新计算一次余数 $S(x)$,而余数是通过循环移动的整个报文计算得来,这样的计算势必花费较多时间。为提高定位误码的效率,需要优化计算余数的算法。

6.2 高效的定位算法及实现

由于采用了循环码,因此整个报文循环左移而产生的余数 S_1 可由最初的余数 S_0 产生,即

$$S_0 = D(x) - A(x) - G(x)Q_0(x) = N(x) - G(x)Q_0(x) \tag{6}$$

$$S_1 = xN(x) - G(x)Q_1(x) \tag{7}$$

那么,

$$xS_0 - S_1 = -G(x)[xQ_0(x) - Q_1(x)] \tag{8}$$

式中, S_0 和 S_1 的最高次幂不大于 23, $Q_0(x)$ 和 $Q_1(x)$ 是商。式(8)中等号左边多项式的最高次幂可能为 24,而 $G(x)$ 的最高次幂正是 24,因此括号内计算结果必为常数(0 或 1)才能保证等式右边多项式的最高次幂不大于 24。

分析式(8)可知,如果 S_0 的最高次幂小于 23(即系数 $s_{23} = 0$),那么这个常数必须为 0;如果 $s_{23} = 1$, xS_0 的最高次幂为 24,而 S_1 的最高次幂不大于 23,等式左边不为 0,因此常数为 1。

总结上述分析可得

$$S_1 = \begin{cases} xS_0, & s_{23} = 0 \\ xS_0 + G(x), & s_{23} = 1 \end{cases} \tag{9}$$

式(9)即为余数 S_1 的计算方法,它可直接由检错计算产生的结果 S_0 和生成多项式 $G(x)$ 使用移位及异或运算得出,不必对循环移动的报文重新计算,计算量自然少很多,效率必然很高。据此新算法设计的错误定位实现逻辑如图 2 所示。如图所示,用置信度最低 24 位初始化 L 寄存器,用原始余数初始化 E 寄存器。由于式(9)是循环左移得出的结论,所以必须将 $G(x)$ “高低位翻转”得到 $G^*(x)$,才能确保如图右移计算的结果正确。

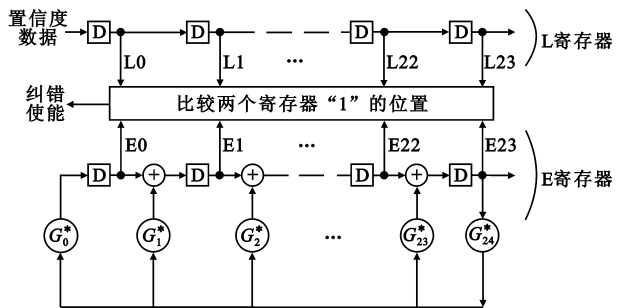


图 2 误码定位实现方法
Fig. 2 Implementation method of error location

图 3 所示为采用改进后的算法的 S 模式应答信号报文纠错流程,此图也说明了纠错的实现方法。

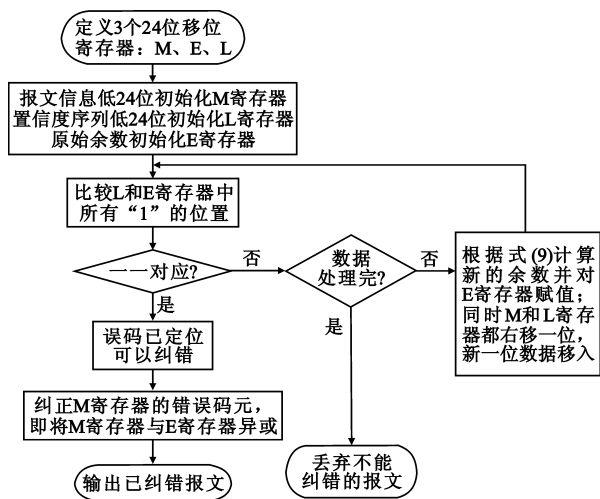


图 3 应答信号报文纠错流程图

Fig.3 The flow chart of reply message error correction

6.3 算法仿真

图 4 所示为改进后的纠错算法仿真计算数据。仿真使用 Matlab 按照图 3 所示流程建立纠错模型,将试验中采集的一次全呼应答报文作为输入,该报文通过 CRC 检错发现了错误。检错后的报文经过纠错模型的处理,输出的结果再经过一次检错,最终证实纠错是成功的。仿真结果验证了算法的正确性。为便于分析,仿真过程中将每一步计算的数据输出。

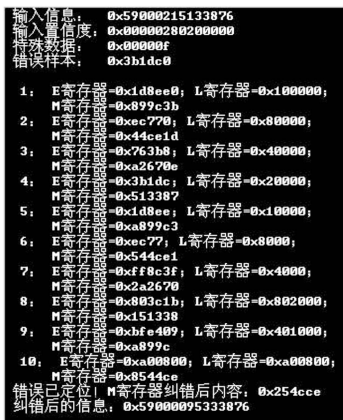


图 4 误码定位的计算数据

Fig.4 The calculation data of error location

7 改进算法的试验情况

从算法的推导过程可以看出,计算中使用了循环移位、异或及比较运算,这些运算非常适于硬件实现。S 模式信号处理的实时性要求很高,在工程中使用 FPGA 实现该纠错算法是很理想的选择。纠错

的最大意义是当空域中飞机密度很大时,它提高了信号的可用性,确保对飞机持续、稳定地监控;同时,减少了请求重发的概率、降低了系统的复杂性。

8 结束语

本文介绍的改进的 S 模式纠错算法具有计算量小、效率高、正确率高、硬件实现容易等特点,该算法对由于突发脉冲干扰而造成错误的应答信号进行纠错,效果十分理想。对 S 模式应答信号纠错,除已介绍的算法外,以下两点还需要深入研究。一是对接收信号正确译码并准确判定置信度。报文信息及相应的置信度是纠错的前提,它们的正确性直接影响纠错的结果,因此需要对译码及判定置信度的方法仔细研究。二是纠正随机错误的算法。在 S 模式信号处理中使用了单脉冲、灵敏度时间控制(Sensitivity Time Control,STC)等先进技术,这些技术可减少无线信道中随机干扰引起的错误,但不可能完全消除;另外,译码过程也可能发生随机错误。虽然这类错误所占比例很小,但也有必要对纠正它们进行研究。

参考文献:

[1] Doc9684 An/951, Manual on the Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems[S].

[2] ICAO, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Volume IV[S].

[3] Galati G, Gasbarra M, Piracci E G. Decoding techniques for SSR Mode S signal in high traffic environment[C]//Proceedings of Radar Conference. [S.l.]:EURAD,2005:399-402.

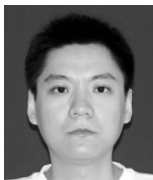
[4] 陈士毅. 模式 S 应答处理中的数据处理[D]. 成都:电子科技大学,2006.

CHEN Shi-yi. Data Processing of Mode S Reply Processing [D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China,2006. (in Chinese)

[5] 樊昌信,张甫翊,徐炳祥,等. 通信原理[M]. 5 版. 北京:国防工业出版社,2005.

FAN Chang-xin, ZHANG Fu-yi, XU Bing-xiang, et al. Theory of Communication[M]. 5th ed. Beijing: National Defense Industry Press,2005. (in Chinese)

作者简介:



梁 丰(1977—),男,四川内江人,2006 年于电子科技大学获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为二次雷达信号处理。

LIANG Feng was born in Neijiang, Sichuan Province, in 1977. He received the M.S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2006. He is now an engineer. His research concerns signal processing of the secondary radar.

Email:franvin_leung@163.com