基于反演策略的星基 ADS-B 信号译码方法

冯　涛[1,2*]，梁　俊[1]

(1. 空军工程大学信息与导航学院　西安　710000；2. 四川九洲空管科技有限责任公司　四川 绵阳　621000)

【摘要】针对低信噪比下星基广播式自动相关监视 (ADS-B) 信号译码准确率低的问题，提出一种基于反演策略的星基 ADS-B 译码技术。基本思想是假设传输一帧 ADS-B 信号的空间在该帧信号传输时间段内是一个稳定的线性系统，接收端接收信号是发射端信号与该线性系统的卷积和。根据该思想，反演译码包括报头检测、空间系统参数估计、报文反演、码脉冲波形修正等关键步骤。仿真实验表明，该方法能够准确实现对低性噪比 ADS-B 信号各码脉冲译码，译码正确率远高于常规单脉冲检测译码技术。

关　键　词　广播式自动相关监视；　译码；　卫星通信；　航空监视

中图分类号　TN92 U279　　**文献标志码**　A　　doi:10.12178/1001-0548.2019107

Space-Based ADS-B Signal Decoding by Inversion Method

FENG Tao[1,2*] and LIANG Jun[1]

(1. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University　Xi'an　710000;

2. Sichuan Jiuzhou Aerocont Technologies Co., Ltd.　Mianyang Sichuan　621000)

Abstract　To solve the problem of low accuracy of space-based automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) signal decoding under low signal-to-noise ratio, the paper proposes a new inversion decoding method. It supposed that the ADS-B signal transmission space is a stable linear system during the transmission period, and the received signal is convoluted by the space system and transmitted ADS-B signal. According to this idea, the inversion decoding includes signal preamble detection, space system parameters estimation, signal inversion, pulse waveform correction. A simulation experiment was conducted. In the experiment, the accuracy ADS-B decoding pulse sequence was extracted and the decoding correctness rate was much higher than the mono-pulse detection method. The results verified the validity of the proposed inversion decoding method.

Key words　ADS-B;　decoding;　satellite communication;　surveillance

广播式自动相关监视 (ADS-B) 是航空监视体系中对空管监视雷达的替代和扩展技术[1-3]，是国际民航组织 (International Civil Aviation Organization, ICAO) 主推的新一代监视技术。星基 ADS-B 覆盖范围远、无视地形等障碍，可真正实现全球实时连续无缝覆盖。世界各航空大国均投入大量资源开展相关研究，美国、欧洲等已经成功发射搭载 ADS-B 系统的通信卫星。

星基 ADS-B 系统接收信号能量弱、信噪比低，目前没有一种专门适用于星基 ADS-B 信号的信号检测与译码方法，这是后续解交织[4]、解码[5-6]等信号处理的基础。最常用的方法是单脉冲检测技术[7-8]，通过检测报文中每个码脉冲信号上升沿、下降沿、平坦度，再根据一定的门限准则判断该码脉冲是否有效。对于星基 ADS-B 信号，其主要特征是能量弱、信噪比低，适用于陆基 ADS-B 信号的检测技术对星基 ADS-B 信号并不适用。常规单脉冲检测译码技术效率低的原因之一是，该方法只利用了接收端信号而丢失了发射端 ADS-B 信号中的可用信息，如 ADS-B 报头具有稳定的结构，充分利用该信息可以提高报文的检测概率。反演技术正是基于这种思路的一种检测技术，在工业 CT 检测[9]、医学成像[10]、地质勘探[11] 等领域均有大量成功应用案例。

本文针对低信噪比 ADS-B 信号译码误码率大的难题，提出了一种基于反演策略的星基 ADS-B 译码方法。该方法假设传输一帧 ADS-B 信号的空间在传输信号的时间段内是一个稳定的线性系统，接收端接收信号是发射端信号与该线性系统的

收稿日期：2019－04－19；修回日期：2019－05－20

基金项目：四川省重大科技专项 (2018GZDZX0022)

作者简介：冯涛 (1982－)，男，博士生，高级工程师，主要从事空管监视与防撞方面的研究. E-mail：persuing@163.com

卷积和。首先通过滑动窗检测方法完成低信噪比的 ADS-B 报头检测，利用检测到的报头数据与理论报头数据进行反演计算，估计空间系统参数；然后利用该帧 ADS-B 接收信号和空间系统参数进行反演计算，得到反演信号；最后将反演信号进行波形校正，实现了 ADS-B 信号译码。通过一组仿真实验展示了本文译码方法的完整操作流程，仿真实验与常规单脉冲检测方法对比，结果表明反演译码方法能够实现对 ADS-B 信号中每个码脉冲准确定位，译码正确率远高于常规单脉冲检测方法。

1　ADS-B 系统

1.1　ADS-B 信号格式

ADS-B 信号有 3 种，分别是 1090ES 数据链、UAT 数据链和 VDL-4 数据链，其中 1090ES 数据链是全球运输航空标准，我国运输航空和通用航空 ADS-B 系统均采用 1090ES 数据链。

1090ES 模式 ADS-B 信号调制频率 1 090 MHz，载波频率允许最大偏差 1 MHz，帧长 120 μs，其中，报头 (前导信号)8 μs，数据域 112 μs。一个完整的 1090ES 模式 ADS-B 信号基本结构如图 1 所示。报头信号由 4 个脉冲组成，脉冲前沿时刻分别为 0、1、3.5 和 4.5 μs，每个脉冲持续时间为 0.5 μs。数据从第 8 μs 开始，120 μs 处结束，采用脉冲位置调制进行信息调制。每一个比特位的码元有两个码片，比特 1 的码元由一个前置脉冲和低电平码片组成，比特 0 由一个低电平和一个后置脉冲码片组成，每个码片持续时间为 0.5 μs。数据域中第 33～88 比特为信息位，包含了 ADS-B 信息的主要信息，第 89～112 比特为 CRC 校验位。

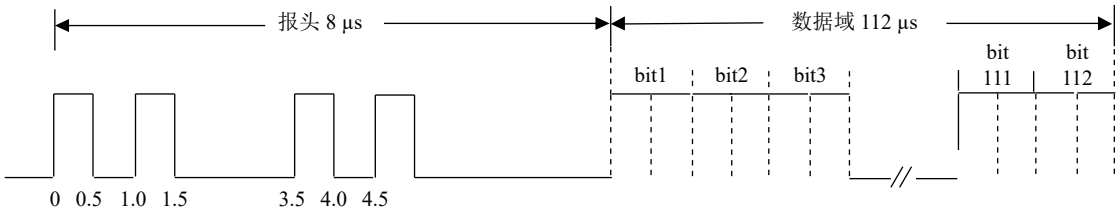


图 1　1090ES 模式 ADS-B 信号格式

1.2　星基 ADS-B 技术挑战

根据某卫星系统运行轨道高度和星座布局，所需探测距离为 3 000 km，信号在传输过程中存在路径损耗，根据式 (1) 估算最大损耗约为 162.7 dB。

$$\mathrm{los} = 32.44 + 20\log D + 20\log F \tag{1}$$

当前机载 ADS-B 信号的发射功率为 250 W，该信号经过最大损耗后到达星载 ADS-B 系统的功率只有−109 dBm，有用信号受到噪声干扰严重。如何在低信噪比下完成对 ADS-B 信号脉冲码识别与准确译码是星基 ADS-B 技术发展的重要基础。

2　反演译码技术

2.1　ADS-B 信号报头检测

每一个 1090ES 模式 ADS-B 都有固定的信号报头格式，如 4 个相邻脉冲间隔分别为 1、3.5 和 4.5 μs，则可以判断该信号为一个有效的 ADS-B 信号报头。根据 ICAO 规定，1090ES 模式有效脉冲判决的依据是，脉内平坦度在 1～2 dB 以内。但是在低信噪比下，信号脉冲受到噪声干扰严重，低电平位置采样点与高电平采样点幅值相差不大。当参考电平选取不当时，1～2 dB 的平坦度可能无法区分信号中的高低电平，但平坦度过小则会导致检测容错力低而丢失真实脉冲，因此，采用单脉冲检测技术可能无法检测出完整的报头。本文在单脉冲检测的基础上，利用 ADS-B 信号报头结构特征进行综合匹配判断，实现低信噪比中报头检测。

ADS-B 报头检测包括单脉冲检测和报头结构滑动匹配判断两个部分。在单脉冲检测中，假设 ADS-B 接收系统的采样频率为F_S，在接收机收到一帧信号后，选取一个参考脉冲电平H_R，以及有效脉冲平坦度范围ΔH，从接收信号第 1 个采样点开始逐点判断其电平幅值H的有效性，如果时刻t_s处采样点幅值$H > H_R - \Delta H$，则认为该采样点幅值有效；若在近邻$N_S = F_S \times 0.5\,\mu s + \Delta N$采样范围内，有效采样点个数$N$的占有率$p = p_0$满足$N/N_S \geqslant p$，则认为该$N_S$个采样点组成了一个有效的 ADS-B 码片脉冲P，脉冲前沿时间为$t_0 = t_s$。参数H_R可根据实际接收信号实时计算，参数ΔH、ΔN、p 可根据实际应用环境人为设置，通常H_R由第 1 个采样点确定，$\Delta H \leqslant 3$ dB，$\Delta N \leqslant F_S \times 0.1\,\mu s$，$p \geqslant 0.75$。

在报头结构滑动匹配判断中，首先将有效码片脉冲P看作 ADS-B 报头第 1 个脉冲，依次从时刻$t_0 + 1\,\mu s \pm \Delta T$、$t_0 + 3.5\,\mu s \pm \Delta T$和$t_0 + 4.5\,\mu s \pm \Delta T$处作为起始时刻计算时间窗$N_S$内有效采样点个数$p_1$、$p_2$和

p_3，若p_1、p_2和p_3中至少有两个满足$p_i \geqslant p$，$i = 1,2,3$，则$P_1 = p_1 + p_2 + p_3$，否则$P_1 = 0$；再将有效码片脉冲P看作 ADS-B 报头第 2 个脉冲，依次从时刻$t_0 - 1\,\mu\text{s} \pm \Delta T$、$t_0 + 2.5\,\mu\text{s} \pm \Delta T$和$t_0 + 3.5\,\mu\text{s} \pm \Delta T$处作为起始时刻计算时间窗$N_\text{S}$内有效采样点个数$p_1$、$p_2$和$p_3$，若$p_2$和$p_3$中满足$p_i \geqslant p$，$i = 2,3$，则$P_2 = p_1 + p_2 + p_3$，否则$P_2 = 0$。

在 ADS-B 信号报头最终判断中，若$P_1 = P_2 = 0$，则判决脉冲P为无效报头信号；若$P_1 \geqslant P_2$，且$P_1 > 0$，则判决脉冲P为有效 ADS-B 报头信号的第 1 个脉冲，ADS-B 信号报头起始时刻为$t_0 = t_\text{s}$；若$P_2 \geqslant P_1$，且$P_2 > 0$，则判决脉冲P为有效 ADS-B 报头信号的第 2 个脉冲，ADS-B 信号报头起始时刻为$t_0 = t_\text{s} - 0.1\,\mu\text{s}$。

2.2 反演译码原理

在本文星基 ADS-B 信号译码应用中，假设 ADS-B 信号传输空间为一个线性系统，在一帧 ADS-B 信号传输过程中，该空间系统参数恒定，则从机载 ADS-B 发射机的无噪信号$x(t)$、空间系统参数$s(t)$和星基 ADS-B 接收系统收到的信号$r(t)$之间满足如下关系：

$$r(t) = x(t) * s(t) + n_\text{e}(t) \tag{2}$$

式中，*表示卷积和计算；噪声$n_\text{e}(t)$满足高斯白噪声分布。

因此，在接收到信号$r(t)$后，若能够估计出$s(t)$和$n_\text{e}(t)$，则使用反卷积算法即可完成原始无噪信号$x(t)$的估计。为便于计算，将卷积计算公式转换成矩阵形式：

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{X} + \boldsymbol{n} \tag{3}$$

式中，$\boldsymbol{R}$、$\boldsymbol{X}$和$\boldsymbol{n}$分别为$r(t)$、$x(t)$和$n_\text{e}(t)$的离散序列表示；若将 $s(t)$ 离散化表示为一维序列 S，则 $\boldsymbol{S}$ 为 S 形成的二维计算矩阵。

根据卷积定义，若$x(t)$和$s(t)$的采样点个数分别为M和L，则$r(t)$的采样点个数应该为$M + L$，并且离散序列满足：

$$\boldsymbol{R}(i) = \sum_{j=1}^{M} \boldsymbol{S}(i,j)\boldsymbol{X}(j) \quad j = 1,2,\cdots,M \tag{4}$$

估计误差为：

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{R} - \boldsymbol{S}\boldsymbol{X} \tag{5}$$

根据最小均方误差准则，最佳的参数$\boldsymbol{X}_\text{opt}$应该使上述误差的均方误差最小，即：

$$f(\boldsymbol{X}) = \text{E}\{|\boldsymbol{e}|^2\} \tag{6}$$

取得最小值或者极小值，式 (6) 称为均方误差性能函数。

2.3 反演译码流程

反演译码的前提是能够具备系统参数$\boldsymbol{S}$的估计值。ADS-B 信号报头不包含任何有用信息，结构稳定，因此，在完成 ADS-B 信号报头检测后，根据反演计算方法[12]可以利用从检测到的报头数据和标准的报头数据得到系统参数$\boldsymbol{S}$的估计值。

假设检测出 ADS-B 信号的报头部分为$\boldsymbol{R}_\text{P}$，标准 ADS-B 信号报头数据为$\boldsymbol{X}_\text{P}$，将式 (6) 中的待求参数换成$\boldsymbol{S}$，则：

$$f(\boldsymbol{S}) = \text{E}\{|\boldsymbol{e}|^2\} = \text{E}\{|\boldsymbol{R}_\text{P} - \boldsymbol{X}_\text{P}\boldsymbol{S}|^\text{T}|\boldsymbol{R}_\text{P} - \boldsymbol{X}_\text{P}\boldsymbol{S}|\} \tag{7}$$

令：

$$\nabla_S f(\boldsymbol{S}) = 0 \tag{8}$$

直接计算可得：

$$\boldsymbol{S}_\text{opt} = (\boldsymbol{X}_\text{P}^\text{T}\boldsymbol{X}_\text{P})^{-1}(\boldsymbol{X}_\text{P}^\text{T}\boldsymbol{R}_\text{P}) \tag{9}$$

理论上讲，标准报头数据的幅值不影响最终的参数估计，因为工程应用感兴趣的是参数的波形而不是数值。但是根据式 (8) 进行反演计算时涉及到矩阵求逆或者迭代求逆计算，检测数据与标准数据之间的幅值相差太大会影响计算结果，因此实际计算中应根据式 (1) 的损耗计算方法对标准信号进行修正，使其幅度值与实际检测信号幅值相近。

一帧 ADS-B 报文在传输过程中经历的信道环境完全一样，因此，ADS-B 信息报头和数据域两个部分受到空间系统的影响相同。假设该帧 ADS-B 信号数据部分的一个码片采样数据为$\boldsymbol{R}_\text{D}$，期望得到的标准 ADS-B 信号报头数据码片采样数据为$\boldsymbol{X}_\text{D}$，则两者与系统参数$\boldsymbol{S}$，满足卷积计算式 (3)，其中$\boldsymbol{S}$由 S 形成。由于$\boldsymbol{R}_\text{D}$和$\boldsymbol{X}_\text{D}$长度相同，$\boldsymbol{R}_\text{D}$实际选取$\boldsymbol{X}_\text{D}$与$\boldsymbol{S}$卷积和的中间部分，相对应的，矩阵$\boldsymbol{S}$行也应进行截断处理。即从原始矩阵$\boldsymbol{S}$的第$L/2$行开始，保留包括该行在内的后续M行数据，使其矩阵行数与$\boldsymbol{R}_\text{D}$长度相匹配。在反演译码计算中，直接将式 (9) 中的$\boldsymbol{X}_\text{P}$替换为$\boldsymbol{S}$，$\boldsymbol{R}_\text{P}$替换为$\boldsymbol{R}_\text{D}$，采用矩阵求逆方法或者线性迭代方法。一帧 ADS-B 信号的数据域包括了 112 个码元，反演译码分为 224 个窗口进行。

最后对反演得到的整段 ADS-B 报文数据进行码元脉冲波形修正，使各码元具有标准的方波脉冲特征。修正方法仍采用单脉冲检测技术，经过波形

修正后的波形即为完整的 ADS-B 报文脉冲序列，计算机读取该标准方波序列即可实现对该 ADS-B 报文中有用信息读取。

3　仿真实验

3.1　实验场景设置

为了验证本文译码方法的有效性，将该方法应用到一帧 1090ES 模式 ADS-B 信号的前 40 μs 部分译码中，并将该译码方法与常规单脉冲方法比较，本文译码方法过程包括报头检测、空间系统参数估计、数据域译码 3 个步骤，各步骤中的参数如表 1 所示，信道干扰为加性随机高斯白噪声，常规单脉冲检测方法相关参数与表 1 中相同。

表 1　仿真参数

阶段	参数内容	数值
信号生成	采样频率F_S/MHz	40
	标准脉冲幅值	1
	信噪比/dB	−1.58
报头检测	脉冲平坦范围ΔH/dB	2
	采样偏差范围ΔN	4
	检测偏差时间ΔT/μs	0.1
	有限采样点占有率p/%	≥90
空间系统参数估计	标准报头截选时间段/μs	[0,5]
	接收报头截选时间段/μs	[0,5]
	系统参数持续时间/μs	0.5
数据域译码	标准数据码片长度	20
	接收数据码片长度	20
	系统参数长度	20

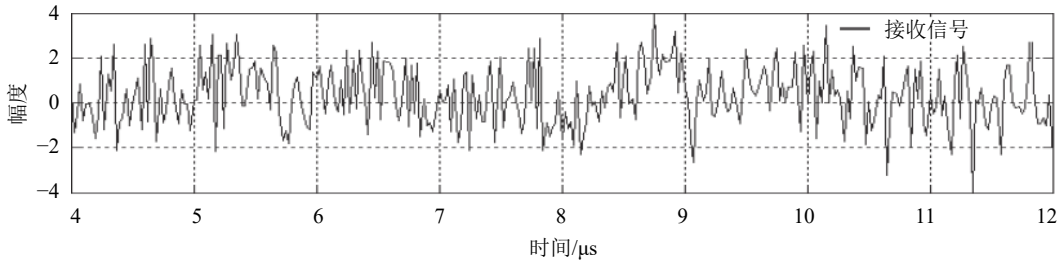
仿真实验中模拟的 ADS-B 信号数据域第 1～5 位设置为 10001，第 6～8 位为 010，第 9～32 位地址位设置为 0。为数据观测方便，本文仿真实验只对上述部分的 ADS-B 报文做译码测试，测试结果并不影响整体性能分析。另外，本文实验中使用的模拟 ADS-B 报文码元组成仅为了仿真实验观测方便，并不代表真实 ADS-B 报文结构。

3.2　仿真结果分析

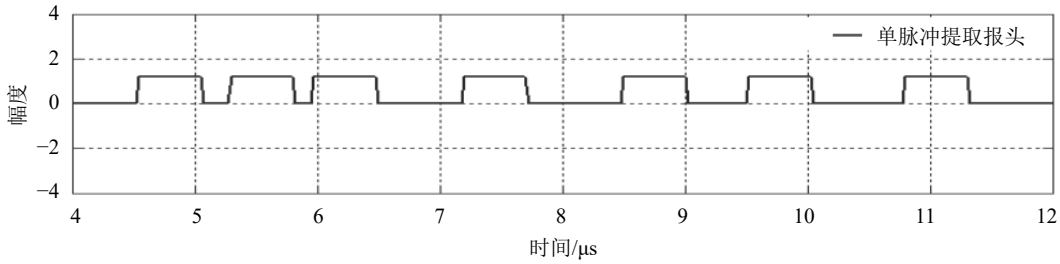
3.2.1　报头检测

仿真 ADS-B 信号按表 1 中信号生成参数产生，报头信号幅度值为 1，信噪比为−1.58 dB，仿真实验中数据采样率为 40 MHz，ADS-B 信号报头到达时间为 5 μs，分别采用常规单脉冲检测技术和本文滑动窗匹配检测技术提取该信号报头，两方法中的参考脉冲电平H_R为含噪接收信号 0 μs 时刻开始前 20 个波峰平均值，两方法其他参数与表 1 中报头检测部分设置参数一致。

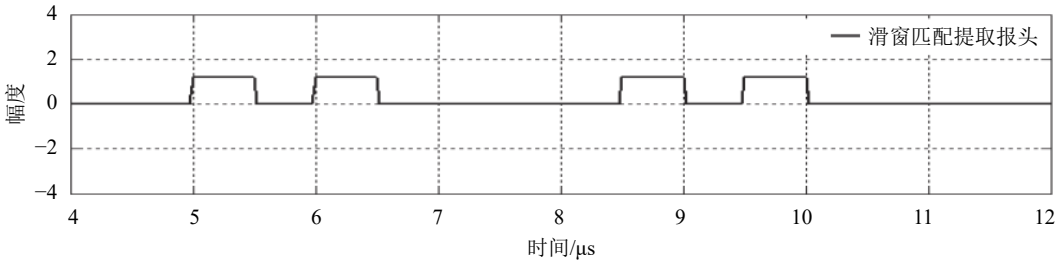
实际报头检测结果如图 2 所示，由图可见，常规单脉冲检测技术将含噪接收信号中疑似码片的信号段提取出来，并标记为有效码片脉冲，但是缺乏报头整体判断，该方法在第 4～12 μs 时间段内从该段信号中共检测出 7 个码片脉冲，实际只有 3 个与理论 ADS-B 报头的第 2、3 和 4 码片脉冲位置吻合。滑动窗匹配方法在单脉冲提取结果的基础上识别出 ADS-B 的第 1 个码片脉冲位置，其他无效位置上提取的疑似码片脉冲全部被抑制，实测第 1 个检测码脉冲前沿时刻为 5 μs，第 4 个码脉冲结束时刻为 10 μs，滑动窗匹配检测方法提取出的信号报头与理论信号报头码片脉冲位置完全一致。



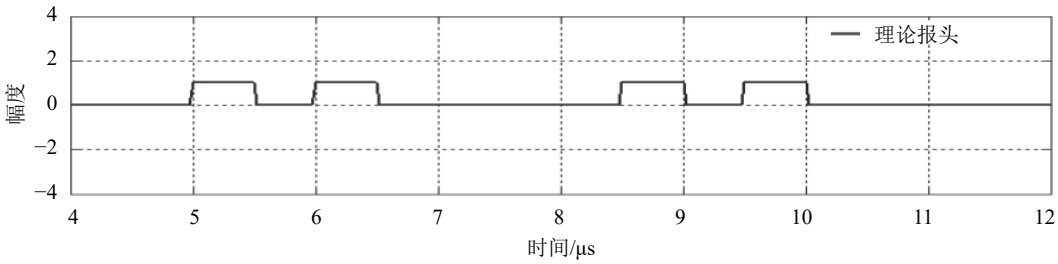
a. 接收到的含噪信号



b. 使用单脉冲检测技术提取的码片脉冲



c. 使用滑动窗匹配技术提取到的码片脉冲曲线



d. 理论 ADS-B 报头信号

图 2 ADS-B 信号报头检测

3.2.2 空间系统参数估计

按照 ADS-B 信号报头检测结果，选取图 2 中 4.75～10.25 μs 段含噪接收数据为$\boldsymbol{R}_{\mathrm{P}}$，标准 ADS-B 信号报头部分为$\boldsymbol{X}_{\mathrm{P}}$，信号传输空域的状态参数为$\boldsymbol{S}$，根据反演计算式 (9) 可得持续时间 0.5 μs 的空间系统状态参数分布如图 3 所示。

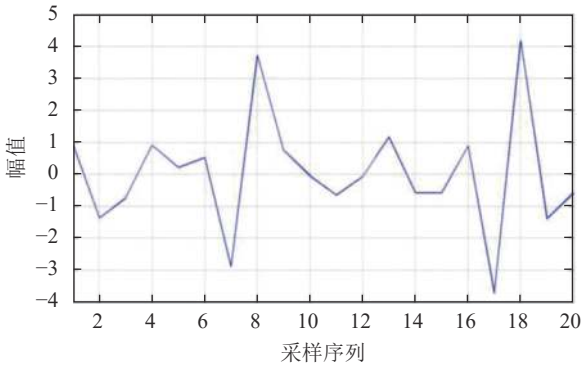


图 3 空间系统参数

空间系统参数并没有固定的数值结构，只与信号传输当时的空间状态有关，在不同时段和不同空间位置传输的 ADS-B 信号所经历的空间系统参数不能通用。

3.2.3 数据域反演译码

假设同一帧 ADS-B 信号在空间传输过程中空间状态稳定，该帧广播信号各段数据经历的空间系统参数完全相同，构造反演系统参数矩阵为：

$$\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix} S_{\frac{L}{2}} & S_{\frac{L}{2-1}} & \cdots & S_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ S_{\frac{L}{2+1}} & S_{\frac{L}{2}} & S_{\frac{L}{2}-1} & \cdots & S_1 & 0 & \cdots & 0 \\ & & & \ddots & & & & \\ S_L & S_{L-1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & S_1 \\ 0 & S_L & S_{L-1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & S_2 \\ & & & \ddots & & & & \\ 0 & \cdots & 0 & S_L & S_{L-1} & \cdots & \cdots & S_{\frac{L}{2}-1} \end{bmatrix} \tag{10}$$

在对接收信号数据域反演计算中，一个码元接收数据 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{D}}$ 和待求码元数据 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{D}}$ 长度均为 L，则三者的卷积计算可表示为：

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{D}}=\boldsymbol{S}\boldsymbol{X}_{\mathrm{D}} \tag{11}$$

则第 i 个码元处的反演计算式为：

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{D}i}=(\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S})^{-1}(\boldsymbol{S}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_{\mathrm{D}i}) \tag{12}$$

式中，$\boldsymbol{R}_{\mathrm{D}i}$为第 i 个码元接收数据；$\boldsymbol{X}_{\mathrm{D}i}$为第 i 个码元反演数据。

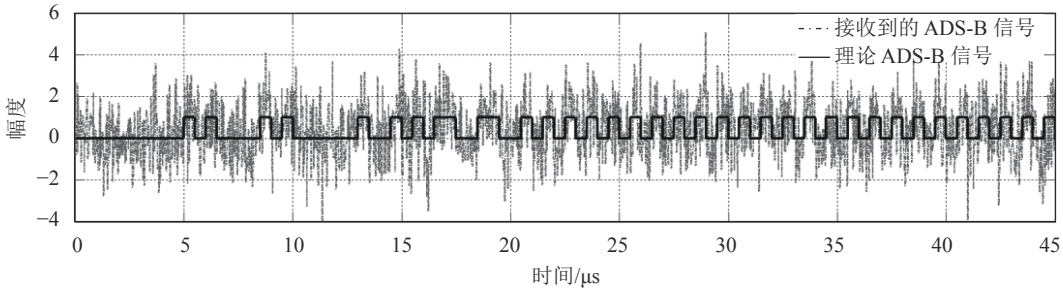
从接收到的 ADS_B 信号第$t=t_0+8$处开始依次截选时间窗为 0.5 μs 的数据作为数据域一个码元长度数据 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{D}}$，窗口内数据采样点数为$L=F_{\mathrm{s}}\times\Delta t=40\times0.5=20$。按照式 (12) 通过滑动窗口分步完成对数据域的反演计算。

为了保持反演计算结果数据的完整性，再对报头部分的数据进行反演计算，即根据接收到的 ADS-B 信号第 0～$t=t_0+8$ μs 处数据$\boldsymbol{R}_{\mathrm{P}}$、系统参数矩阵 $\boldsymbol{S}$，按照式 (12) 反演计算报头数据 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{P}}$。

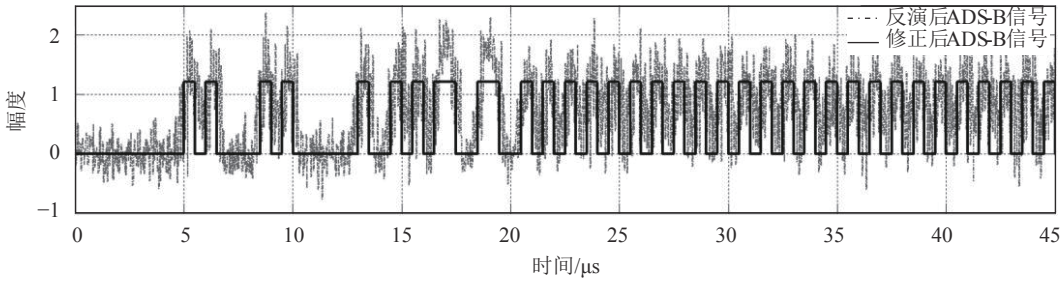
对于一帧完整的 ADS-B 报文信号，反演计算

得到的 ADS-B 信号格式为$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{X}_{\mathrm{P}} + \sum_{i=1}^{224} \boldsymbol{X}_{\mathrm{D}i}$。对反演得到的 ADS-B 信号进行波形修正得到最终的报文脉冲序列。

按照本文提供的译码操作流程，对该段模拟 ADS-B 信号进行译码，得到的计算结果如图 4 所示，图 4a 中虚线为接收到的含噪 ADS-B 信号，实线为该段 ADS-B 信号的理论波形，即无噪声 ADS-B 信号；图 4b 中虚线为通过反演计算式得到的 ADS-B 信号，实线为对反演结果进行波形修正后的 ADS-B 报文脉冲序列。由图可见，反演计算结果能将 ADS-B 报文中低电平处的噪声很好地压制，提升报文中高电平处的脉冲特征，通过对反演结果进行简单的波形修正即可得到与理论 ADS-B 报文完全一致的脉冲序列。

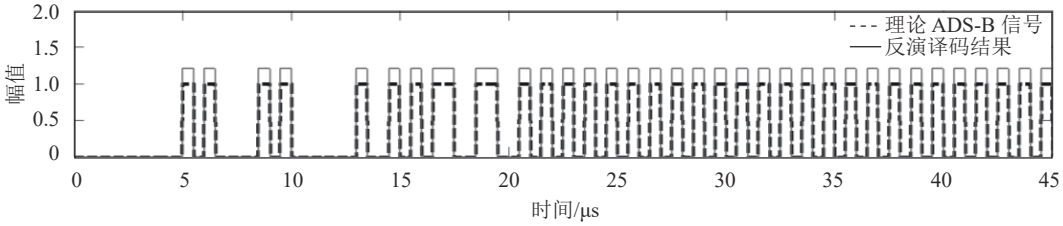


a. 含噪 ADS-B 信号与理论 ADS-B 信号

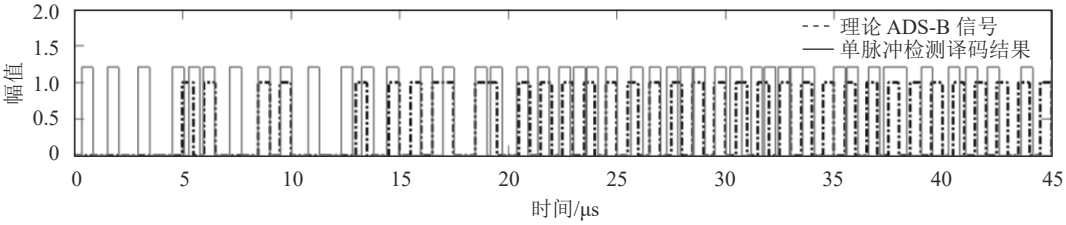


b. 反演计算ADS-B信号及其修正ADS-B信号

图 4　ADS-B 反演译码结果



a. 反演译码结果及其理论 ADS-B 报文参照



b. 常规单脉冲检测技术译码结果及其理论ADS-B报文参照

图 5　ADS-B 反演译码与单脉冲检测结果对比

把常规单脉冲检测技术应用到模拟 ADS-B 信号的译码中，将检测结果与本文的反演译码结果进行对比。图 5 为两种方法得到的译码结果，其中，图 5a 为反演译码结果及其理论 ADS-B 报文参照，图 5b 为常规单脉冲检测技术译码结果及其理论 ADS-B 报文参照。由图可见，反演译码结果的每个码元脉冲位置均与理论 ADS-B 报文脉冲序列完全吻合，单脉冲检测技术得到的译码脉冲则很少能

与理论 ADS-B 报文脉冲位置重合，并且该方法得到了大量的无效脉冲。单脉冲检测技术在本文实验中译码效率低下的主要原因是模拟信号的信噪比低，噪声高能量和高平稳特性掩盖了原始报文的高低电平特征，限制了单脉冲检测技术的性能。通过该组对比实验进一步验证了本文提出的反演译码方法的有效性。

4 结 束 语

低信噪比下的星基 ADS-B 信号检测与译码是星基 ADS-B 中的难点。本文提出了一种基于反演策略的译码技术，假设传输一帧 ADS-B 信号的空间在传输信号的时间段内是一个稳定的线性系统，接收端接收信号是发射端信号与该现行系统的卷积和。利用 1090ES 模式 ADS-B 信号报头特点，本文设计了一种反演译码算法流程，并通过仿真试验进行了验证，结果表明本文方法能在信噪比为 −1.58 dB 的情况下实现对 ADS-B 信号各码脉冲准确译码，正确率远高于常规单脉冲检测技术。

虽然将反演技术应用于星基 ADS-B 信号译码是本文首创，也仅是对该方法进行了理论仿真验证。但反演技术是在多个领域经过实际工程验证的可靠技术，因此，基于反演技术的 ADS-B 译码方法具有理论可行性。在下一步的研究中，可将该方法应用于实际星基 ADS-B 信号的译码中，研究适用于实际应用环境特征 (如动态性、非平稳性、非高斯性等) 的反演模型、反演计算方法、算法适用边界、算法实施流程、不同帧信号空间参数区分等，提高该方法的适用性和稳定性。

参 考 文 献

[1] JUNICHI N, HIROMI M, HIROHISA T. Measurement-based evaluation on detection probability of extended squitter for air-to-ground surveillance[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(10): 8883-8894.

[2] MARTIN S, VINCENT L, IVAN M. On the security of the automatic dependent surveillance-broadcast protocal[J]. IEEE Communication Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 1066-1087.

[3] 王洪全, 刘天华, 欧阳承曦, 等. 基于星基的 ADS-B 系统现状及发展建议[J]. 通信技术, 2017, 50(11): 2483-2489.
WANG Hong-quan, LIU Tian-hua, OUYANG Cheng-xi, et al. Situation and development of satellite-based ADS-B system[J]. Communications Technology, 2017, 50(11): 2483-2489.

[4] 吴杰, 郭建华, 蒋凯, 等. ADS-B 二重交织信号时域分离算法[J]. 通信技术, 2017, 50(10): 2184-2189.
WU Jie, GUO Jian-hua, JIANG Kai, et al. ADS-B double interwined signal separation algorithm in time domain[J]. Communication Technology, 2017, 50(10): 2184-2189.

[5] 张辰. ADS-B 信号解码板设计及报文处理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
ZHANG Chen. The design of ADS-B signal deconding board and message processing[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.

[6] DEBIAO H, NEERAJ K, KIM-KWANG R, et al. Efficient hierarchical identity-based signature with batch verification for automatic dependent surveillance-broadcast system[J]. IEEE Transaction forensics and Security, 2017, 12(2): 454-464.

[7] 胡体玲, 李兴国. 单脉冲探测技术的发展综述[J]. 现代雷达, 2006, 28(2): 24-29.
HU Ti-ling, LI Xing-guo. Research on development of mono-pulse detection technology[J]. Modern Radar, 2006, 28(2): 24-29.

[8] 刘晓斌, 何春, 张超, 等. ADS-B 接收机 S 模式关键算法研究及实现[J]. 现代雷达, 2011, 33(7): 36-39.
LIU Xiao-bin, HE Chun, ZHANG Chao, et al. Study and realization on mode S key algorithm of ADS-B receiver[J]. Modern Radar, 2011, 33(7): 36-39.

[9] 王振宇. 土木工程的层析成像与广义反演研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
WANG Zhen-yu. Study on the computer tomography and generalized inversion of civil engineering[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.

[10] VILLE K, ANTTI V, SAMULI S, et al. Parallelized Bayesian inversion for three-dimensional dental X-ray imaging[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2014, 52(12): 7495-7503.

[11] ARIA A, TAREK M, VLADIMIR L, et al. An enhanced Gauss-Newton inversion algorithm using a dual-optimal grid approach[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(6): 1419-1427.

编 辑 漆 蓉