

强干扰背景下 S 模式解码方法

王 洪^{①②} 刘昌忠^① 汪学刚^② 吴宏刚^①

^①(中国民用航空局第二研究所 成都 610041)

^②(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘 要: 当 S 模式应用于多点定位和 ADS-B 系统时, 面临高密度的 A/C 脉冲干扰, 现有解码方法将导致较高的错误率和低置信度数据。该文针对 A/C 干扰严重的环境, 改进了 S 模式数据解码方法, 包括中点判决法、基线多点判决法、基于查表的多点判决法和简化表格的多点判决法。通过分析 40,000 次/秒干扰的重叠概率, 提出了干扰环境的模拟方法, 并对几种解码方法进行了大量的仿真, 获得了很高的解码正确率, 验证了几种 S 模式数据解码方法的有效性。

关键词: 多点定位; 自动广播相关监视; 混扰; S 模式

中图分类号: TN958.96

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)12-2876-05

Mode S Decoding Methods in Heavy Jamming Environment

Wang Hong^{①②} Liu Chang-zhong^① Wang Xue-gang^② Wu Hong-gang^①

^①(The Second Research Institution of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China)

^②(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Mode S signals are exposed to heavy A/C fruits when used in multilateration and ADS-B systems. Current decoding methods will lead to many decoding errors and low confidence declaration. Mode S decoding techniques are introduced in this paper. There are center amplitude method, baseline multi-sample technique, multi-sample technique with table lookup technique and reduced table lookup technique. The overlapping probability on 40,000 fruit per second is analyzed, then a method is proposed to simulate true jamming environment. Finally, effects of algorithms are evaluated by a great of decoding experiments. High decoding accuracy in experiments shows that these methods are very effective.

Key words: Multilateration; ADS-B; Fruit; Mode S

1 引言

为了适应空中交通流量高速增长的需求, 国际民航组织(ICAO)提出了先进的机场场面活动引导和控制(A-SMGCS)新概念。A-SMGCS 以安全、效率和容量为三大目标, 包括监视、控制、路由和引导 4 项基本功能, 多点定位(MLAT)系统和 ADS-B 系统是是实现其监视功能的核心技术, 代表了未来民航空中交通管制的发展趋势, 将与现有二次雷达系统协同工作并进一步取代二次雷达系统^[1-5]。二次雷达工作在 A/C 模式或 S 模式, 由于监视的目标数量较少, 处理窜扰(Fruit)的密度一般不超过 4000 次/秒。我国地面雷达站为 A/C 模式, 全部更换这些设备需要大量的资金投入和较长的时间, 即使多点定位系统和 ADS-B 系统得到应用, A/C 模式的询

问和应答信号也将长期存在。在 MLAT 和 ADS-B 系统中, 监视的目标可达 500 个以上, A/C 脉冲与 S 模式信号载频相同, 对 S 模式信号形成很强的干扰, 使系统承受窜扰的能力提升到 40,000 次/秒, 采用现有的 S 模式的数据解码方法, 产生的误码率和低置信度数据超过了系统的可靠性要求。安全是 A-SMGCS 的第一目标, 本文针对 A/C 模式应答信号的干扰问题, 研究了几种 S 模式的增强解码技术, 包括中点判决法、基线多点判决法、查表法和简化查表法等, 通过仿真模拟了 40,000 次/秒的干扰环境, 并对几种方法进行了仿真验证。

2 数据解码方法

S 模式的应答信号如图 1 所示^[5,6], 前 8.0 μs 为前导脉冲, 后面为脉位调制(PPM)的数据块, 数据块为 56 bit 或 112 bit, 每个 bit 周期 1 μs , 包含两个 chip(站位和空位), 前一个 chip 高后一个 chip 低为数据“1”, 后一个 chip 高前一个 chip 低为数据“0”。脉冲宽度误差为 0.05 μs , 上升沿为 50~100

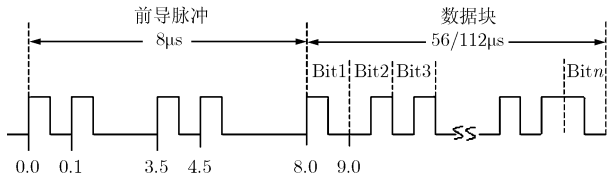


图1 S模式应答信号

ns, 下降沿为 50~200 ns。通过前导脉冲检测获得信号到达时间和脉冲参考电平等参数, 根据这些参数进行数据块解码, 判断出数据位的“0”“1”取值和置信度高低。

(1)6 dB 阈值法 6 dB 阈值法是目前采用的主要方法^[7], 如图 2(a)所示。取两个 chip 的中点采样值, 以幅度大的采样点判定脉冲出现的位置, 给出对应解码值“0”或“1”。比前导脉冲参考电平低 6 dB 作为阈值电平, 若两个采样点与阈值相比为一高一低, 则认为脉冲的数据解码为高置信度, 如图 2(a)中序号 1-3 的脉冲。若两个中点采样值与阈值相比均为高或均为低, 则输出低置信度。当 A/C 模式脉冲干扰 S 模式数据脉冲时, 将影响数据解码的准确度和置信度判决。A/C 模式脉冲叠加到 S 脉冲的高电平段, 对数据的解码无影响, 但脉冲叠加到 S 脉冲的低电平段时, 情况就不同。以数据“1”为例, 如图 2(a)中序号 4, 6 的脉冲, 若 A/C 脉冲能量低于 S 模式脉冲, 数据的解码仍然正确(脉冲 4), 若强于 S 模式脉冲, 则解码出错(脉冲 6)。发生在低电平段的 A/C 干扰高于阈值时, 则数据的解码置信度为低。当 A/C 干扰严重时, 出现解码错误和低置信度输出的概率增加, 而低置信度数据的输出将增加数据校正的运算量。下面讨论几种改进的方法^[1]。

(2)中点判决法 按照 ICAO 的规定, S 模式脉冲串的脉内平坦度在 1-2 dB 以内, 未受干扰的数据脉冲电平和前导脉冲电平应在此范围内, 以此作为判决的依据^[1]。该方法同样取两个 chip 中点采样值判决, 以前导脉冲参考电平为基准, 确定±3 dB 范围, 两个中点出现 4 种情况: 一个点在±3 dB 内, 另一个点比该范围低; 一个点在±3 dB 内, 另一个点比该范围高; 两个点都在±3 dB 内; 两个点都在±3 dB 外, 如图 2(c)所示。判定方法: 前两种情况根据±3 dB 内点的位置判定“0”“1”, 输出高置信度; 后两种情况为低置信度, 输出数据由两个点中的高电平点决定。该方法也称为±3 dB 窗法。

采用±3 dB 窗的方法, 图 2(a)中序号 4, 6 的脉冲都能正确解码, 如图 2(b)所示, 可见对干扰有一定的抑制效果, 但该方法也有缺陷。以数据“0”为例, 若受到干扰且干扰能量与信号能量相近, 则出

现 2(c)的序号 4 的情况, 干扰发生在高电平段, 则出现序号 6 的情况, 这时, 都将输出低置信度数据, 解码也可能出现错误。按现有的 6 dB 阈值方法, 干扰发生在高电平段时不影响判决, 因此在±3 dB 窗法出现低置信度判决时再利用 6 dB 阈值法, 可消除序号 6 的情况, 序号 4 的情况则需要采用下面的多点判决方法。还有一种更严重的错误, 由于 A/C 模式脉宽可达到 0.55 μs, 两个 chip 的中点相距约 0.5 μs, 可能出现干扰将空位 chip 的中点抬高到±3 dB 内, 而使高电平的中点超过±3 dB 范围, 这样解码将错误且置信度为高, 低置信度数据需校验后再输出, 因此该错误数据可能是最终的输出结果。当然, 这种情况出现的概率不大, 只有借助多点判决和数据检验技术来消除。

脉冲的数据值信息不仅表现在每个 chip 的中点上, 其它采样点也能辅助判决。设采样率为 10 MHz(下文针对此采样率讨论), 理想的情况是 5 个采样点在参考电平附近, 另外 5 个采样点为噪声电平, 但是 S 模式脉冲有上升沿、下降沿和脉宽误差, 所以高电平 chip 的宽度大于 0.3 μs 就认为是有效脉冲, 这样出现在参考电平±3 dB 内的有效点可能只有 3 个。受干扰影响的脉冲, 落在±3 dB 内的点往往少于正常脉冲, 而且干扰和信号的载频存在偏差, 使脉冲的载波相位发生变动, 解调后的脉冲幅度也将变动, 这些特征都有利于多点判决。多点判决的示意图如图 2(d)所示。

(3)基线多点判决法 以前导脉冲检测输出的

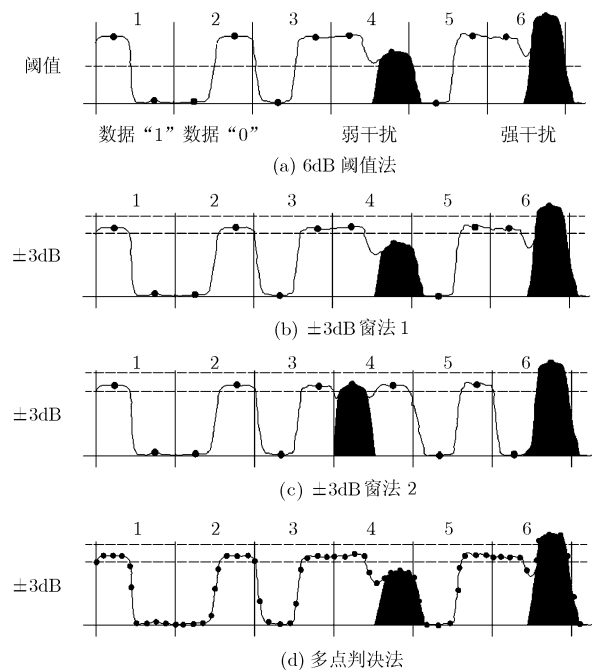


图2 数据解码示意图

参考电平为基准,确定与参考电平匹配的 ± 3 dB窗,比参考电平低6 dB为阈值电平,分别对 ± 3 dB窗和低于阈值的采样点计数。由于中间点相对稳定,计数时采用加权的方法,每个chip的边沿两点乘1,中间点3点乘2,每个chip计数的结果为0~8,(2+3 \times 2=8)。计数时采样点分为4类,A表示在3 dB窗内,B表示低于阈值,1表示为数据脉冲的前0.5 μ s,0表示为数据脉冲的后0.5 μ s,分别为A1, B0, A0, B1,理想的数据“1”和“0”如图3所示,在此范围之外的点不计数^[1]。

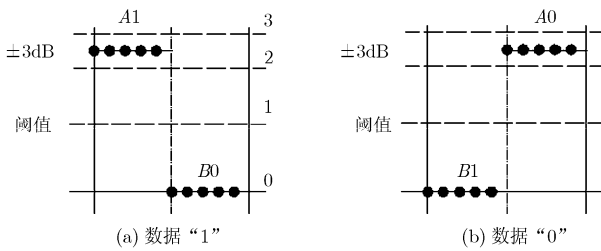


图3 基线多点判决示意图

- A1: 前0.5 μ s中 ± 3 dB窗内的加权计数值;
- A0: 后0.5 μ s中 ± 3 dB窗内的加权计数值;
- B1: 前0.5 μ s中低于阈值的加权计数值;
- B0: 后0.5 μ s中低于阈值的加权计数值。

然后计算两个累加值, S_1 表示衡量与理想数据“1”的匹配程度, S_0 表示衡量与理想数据“0”的匹配程度。

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= A_1 - A_0 + B_0 - B_1 \\ S_0 &= A_0 - A_1 + B_1 - B_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

比较 S_1 和 S_0 的大小,数值大的作为判决输出。当 S_1 或 S_0 的值大于等于3时(与采样率有关),输出数据即认为是高置信度。 S_1 和 S_0 的值为1和2时为低置信度, S_1 和 S_0 的值相等时输出低置信度“0”。

(4)基于查表的多点判决法 以前导脉冲参考电平为基准,将采样点分为4类,如图3(a):

- 0: 小于6 dB阈值;
- 1: 大于6 dB阈值但小于基准-3 dB;
- 2: ± 3 dB窗内;
- 3: 大于基准3 dB。

对任意1 μ s的数据脉冲周期,共有10个采样点,每个采样点的电平有4种取值,共有 $4^{10}=1048567(1\text{ M})$ 种模式。每种模式为数据“1”和数据“0”,同时,用1和0表示高置信度和低置信度,这样所有模式的输出需要两个1 M \times 1 bit的空间来存储查找表。这样,数据的解码就是查找对应模式在表中的输出。当采样率变化时,表格的存储空间按指数规

律变动。表格的建立依赖于大量数的仿真实验,对实验的统计结果获得每种模式的输出,从而建立表格。具体方法如下:对每秒40000个fruit干扰的信号作数百万次的仿真实验,每一个bit的值预先知道,受干扰后出现某种模式,对同一模式记录其次数和真实值为“0”“1”的次数。例如:某模式出现了6000次,其中5900次为1,说明90%以上的可能性为“1”,不为“1”的可能性低于10%。统计结果按下面的方法得到各模式的输出数据和置信度:

H1: 该模式真实值为1的次数大于90%,高置信度为1;

L1: 该模式真实值为1的次数为50%~90%,低置信度为1;

L0: 该模式真实值为1的次数为10%~50%,低置信度为0;

H0: 该模式真实值为1的次数低于10%,高置信度为0。

也就是说,高置信度数据的不确定性低于10%,而低置信度数据最高的可靠性为90%,最低的可靠性(或不确定性)为50%。

(5)基于简化表格的多点判决法 该方法的目的是减少查表法的表格存储空间和表格查找时间。将1 μ s周期内的采样点分为两组,奇数采样点和偶数采样点,分别按上面的查表法建立查找表格,每组对应 $4^5=1024(1\text{ k})$ 种模式,然后联合两组表格做出判断。由于奇偶采样点均包含了整个脉冲周期的数据,用其进行模式判决仍然合理,但每组单独判定时,使用的采样点少,分辨率降低,数据判决的模糊性更大,所以将数据判定的置信度分为3级,分别为

H1: 该模式真实值为1的次数大于90%,高置信度为1;

M1: 该模式真实值为1的次数为70%~90%;中置信度为1;

L1: 该模式真实值为1的次数为50%~70%;低置信度为1;

L0: 该模式真实值为1的次数为30%~50%;低置信度为0;

M0: 该模式真实值为1的次数为10%~30%;中置信度为0;

H0: 该模式真实值为1的次数低于10%;高置信度为0。

这里将置信度阈值设为10%和30%,如果错误概率低于10%,则做出高置信度的判决,如果错误概率在10%~30%之间,做出中置信度判决(见M1和M0的定义)。两组一致的中置信度输出可以判定

为高置信度, 因为其错误概率为: $0.3 \times 0.3 = 0.09$, 符合高置信度的定义。由于置信度等级增加, 奇偶组的输出判决数据和置信度表格大小为 1024×3 , 总共需要的空间大小为 1024×6 。

每种模式从奇偶组表格差得其输出数据和置信度, 然后联合判决, 奇偶联合判决表格与采样率无关, 联合判决的表格如表1所示。判决的原则为:

表1 联合判决表

奇数组	偶数组						U
	H1	M1	L1	L0	M0	H0	
H1	H1	H1	H1	H1	H1	L0	L1
M1	H1	H1	L1	L1	L0	H0	L1
L1	H1	L1	L1	L0	L0	H0	L1
L0	H1	L1	L0	L0	L0	H0	L0
M0	H1	L0	L0	L0	H0	H0	L0
H0	L0	H0	H0	H0	H0	H0	L0
U	L1	L1	L1	L0	L0	L0	L0

(1)一致性原则: 奇偶组判决结果一致时按一致结果输出, 如: H1-H1 输出 H1, 两个中置信度判决结果升高置信度, 如: M0-M0 输出 H0, 低置信度与中置信度相遇降低至低置信度, 如: L1-M1 输出 L1。

(2)矛盾原则: 奇偶组判决结果为相同置信度的0和1, 输出 L0, 如: M1-M0 输出 L0; H与矛盾的M和L相遇输出H的结果, 如: H0-M1 输出 H0; M与矛盾的L相遇按M的数据输出, 置信度降一级, 如: M1-L0 输出 L1。

上述方法统计了所有的模式, 但在仿真中发现, 有的模式完全不出现或出现次数很低, 因为这些模式表明脉冲已经完全畸变, 不再是有效的 PPM 调制脉冲, 在数百万次统计中出现次数只有几次到几十次, 不具有统计意义。这种模式将其判决为未知, 即 U(Unknown)。由于受到严重干扰, 在联合判决时输出数据由另一组判决, 而置信度为低。

3 算法仿真

(1)数据源说明: S模式和A/C模式基带数据随机产生, 上升沿和下降沿等参数符合 ICAO 规范, 信号在调制后合成, 载频偏差, 载波相位, 信号幅度随机产生, 信号解调后抽取到 10MSPS。

(2)对 40,000 次/秒 A/C 干扰的模拟方法: 1 s 时间对应大量的采样点和干扰信号, 运算非常复杂, 实验中首先将时间缩减到 1 ms, 1 ms 内平均分布的干扰降至 40 次。S 模式信号的重复周期大于 1 s,

可计算出单个 S 模式信号在 1 ms 内被 A/C 干扰重叠的概率。证明如下:

S 模式长脉冲为 $120 \mu\text{s}$, A/C 干扰与其重叠的时间区间为 $120 + 20.75 \times 2 = 161.5 \mu\text{s}$, 各干扰信号落到 1 ms 的区间服从均匀分布, 则单个 A/C 信号与 S 模式信号重叠概率为 $p = 161.5/1000$, 各干扰与 S 模式信号重叠的事件为相互独立且概率相等。设 1 ms 内有 3 个 A/C 干扰, 则

1 ms 内单个 S 模式信号与 0 个 A/C 干扰重叠的概率为 $C_3^0(1-p)^3$;

1 ms 内单个 S 模式信号与 1 个 A/C 干扰重叠的概率为 $C_3^1 p(1-p)^2$;

1 ms 内单个 S 模式信号与 2 个 A/C 干扰重叠的概率为 $C_3^2 p^2(1-p)$;

1 ms 内单个 S 模式信号与 3 个 A/C 干扰重叠的概率为 $C_3^3 p^3$;

上述概率之和为 $(1-p)^3 + 3p(1-p)^2 + 3p^2(1-p) + p^3 = (p + (1-p))^3 = 1$ 。用上面的方法同样可以验证 4 个干扰的之和为 1, 并进而推广到 40 个干扰的情况, 重叠 0 个到 15 个干扰的概率分别:

[0.0009, 0.0067, 0.0252, 0.0615, 0.1096, 0.1520, 0.1707, 0.1597, 0.1269, 0.0869, 0.0519, 0.0273, 0.0127, 0.0053, 0.0020, 0.0007]

上述 16 种事件的概率之和为 0.9997, 仿真中产生均匀分布的随机数, 根据概率分布划分区间, 根据随机数落到的取值区间确定每次产生单个 S 模式信号源样本的 A/C 干扰个数, 在 $161.5 \mu\text{s}$ 内各干扰分布时间随机。

(3)仿真结果: 如图 4 所示, 验证数据共 $10 \text{ k} \times 112 = 11.2 \text{ M bit}$, 分别统计了 4 种解码方法的误码率和的低置信度率, 而错误解码而又输出高置信度的个数(在后级数据校验中可能遗漏)单列在图 4(c)中, 信噪比分别为 0-30 dB。仿真结果说明: 基线多点和简化查表法的误码率和低置信度率很低, 在信噪比为 4 dB 时, 简化查表法的误码率仅为 0.1%。 $\pm 3 \text{ dB}$ 窗的方法的低置信度率解码高于 6 dB 阈值法, 但低置信度数据(两个中点均在 $\pm 3 \text{ dB}$ 窗内或均在窗外)采用的判断方法与 6 dB 阈值法相同, 所以其解码准确率优于 6 dB 阈值法。 $\pm 3 \text{ dB}$ 窗法在信噪比低于 6 dB 时, 高置信度误码率受信噪比影响较大, 因为噪声进入窗内会直接影响判断。信噪比大于 8 dB 后几种方法的性能都趋于稳定, 而实际机场信号的信噪比一般都在 10 dB 以上, 只有远距离目标的信噪比才较低。简化查表法首先要建立 $1 \text{ k} \times 2$ 的模式对照表, 数据源要尽量覆盖所有模式且能近似真实环境, 即使在实际工程中应用的表格也需要

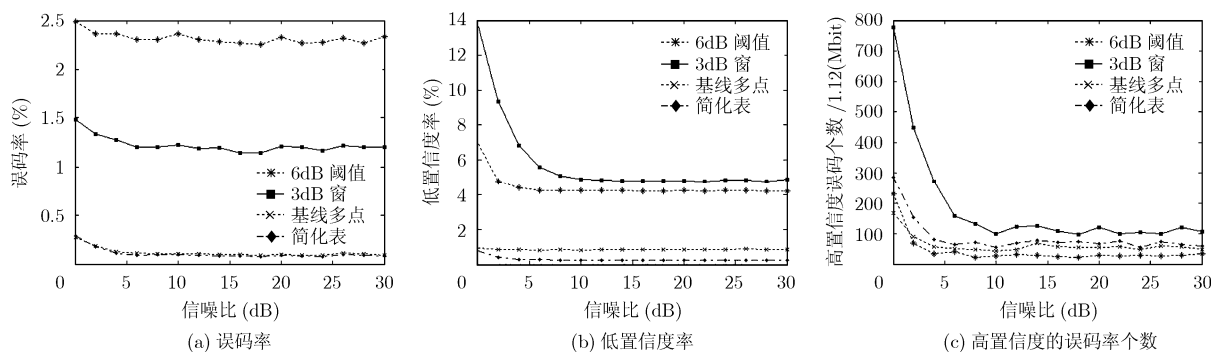


图4 算法仿真结果

依靠仿真方法来建立。查表法的建表较复杂，解码时主要是查表运算，运算量不大。

(4)方法比较: 6 dB 域值法和中点判决法只取两点判决，运算量很低，但误码率和低置信度率高于其他方法，这两种方法中中点判决法相对更优。查表法的建表运算量较大，建表的仿真数据与真实数据要求近似，但使用中只做查表计数运算，准确率很高。其中简化查表法的表格存储量和查表时间相对较少。基线多点判决法在增加少量运算量的情况下，显著提高了准确率，综合考虑运算量和准确率时，该方法最优。

4 结束语

围绕 A/C 模式脉冲对 S 模式信号的干扰问题，本文研究了几种改进的 S 模式解码技术，通过仿真验证了算法的有效性，能在计算量不大的情况下大大减少错误解码率，降低数据的低置信度率，工程适用性很强。前导脉冲的到达时间和参考电平对数据解码有很大影响，数据校验技术则可进一步确保数据的正确可靠，将在下一步的工作中研究。

参考文献

- [1] RTCA. DO-260A: 1090 Minimum Operational Performance Standard for ADS-B and TIS-B[S], 2006.7.
- [2] RTCA, DO-242A: ADS-B Minimum Aviation System Performance Standard[S], 2006.12.
- [3] 吕小平. MDS技术在我国民用航空的应用探讨[J]. 空中交通

管理, 2006, 23(9): 4-11.

- Lu Xiao-ping. Discussions on the application of MDS technology in China civil aviation [J]. *Air Traffic Management*, 2006, 23(9): 4-11.
- [4] 包悦. ADS-B 空中监视技术的发展方向. 空中交通管理[J]. 2007, 24(6): 17-18.
- Bao Yue. ADS-B Development trends of surveillance technology. *Air Traffic Management*, 2007, 24(6): 17-18.
- [5] ICAO. Manual on the secondary surveillance radar system [S]. 2004.
- [6] 王洪, 刘昌忠, 汪学刚. 二次雷达 S 模式综述[J]. 电讯技术, 2008, 48(7): 113-118.
- Wang Hong, Liu Chang-zhong, and Wang Xue-gang. Mode S for secondary surveillance Radar (SSR): an introduction and overview[J]. *Telecommunication Engineering*, 2008, 48(7): 113-118.
- [7] Galati G, Gasbarra M, and Piracci E G. Decoding techniques for SSR mode S signals in high traffic environment[C]. The 2005 European Microwave Conference. Rome, 2005, Vol. 3: 4-6.

王洪: 男, 1974年生, 博士后, 讲师, 研究多点定位、数字接收机和高速实时信号处理等。

刘昌忠: 男, 1956年生, 高级工程师, 研究方向为机场场面监视技术等。

汪学刚: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理等。

吴宏刚: 男, 1976年生, 博士, 高级工程师, 研究多点定位等。