

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.01.021

1 030/1 090 MHz 频谱的共享与干扰问题综述*

王 洪**

(电子科技大学 电子工程学院,成都 611731)

摘要:1 030/1 090 MHz 频率广泛应用于民用和军用航空电子系统中,随着飞行器和机场地面设备的快速增加,1 030/1 090 MHz 频谱的共享越来越复杂,由此带来的干扰问题日趋严重。研究了使用1 030/1 090 MHz 频率的各种电子系统的工作原理和机制,包括二次监视雷达、自动广播相关监视系统、多点定位系统、空中防撞系统、敌我识别器系统、测距仪和交通信息广播服务系统等,重点分析了各系统对该频点的使用频度,讨论了可能出现的各种干扰形式,指出了对1 030/1 090 MHz 频谱现状进行监测,对未来的干扰环境和应用系统的性能进行评估的重要意义。

关键词:1 030/1 090 MHz 频谱共享;二次监视雷达;自动广播相关监视;多点定位;空中防撞系统;敌我识别
中图分类号:TN962 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)01-0105-05

Overview of Sharing and Interference at 1 030/1 090 MHz

WANG Hong

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract:1 030/1 090 MHz frequencies are widely used in civil and military aviations. With fast growing of aircraft and equipment in airports, sharing of 1 030/1 090 MHz frequencies and corresponding interferences are more and more complicated. This paper provides an overview of different applications of 1 030/1 090 MHz frequencies, including Second Surveillance Radar(SSR), Automatic Dependent Surveillance-Broadcast(ADS-B), multilateration, Traffic Collision Avoidance System(TCAS), and Identification of Friend or Foe(IFF), Distance Measurement Equipment(DME) and Traffic Information Services-Broadcast(TIS-B), etc. Usage situation and possible interferences of different systems are analyzed. It is pointed out that 1 030/1 090 MHz monitoring and assessment of interference environment and applications are very important.

Key words:1 030/1 090 MHz sharing; SSR; ADS-B; multilateration; TCA; IFF

1 引言

航空工业的发展为无线电技术的应用开辟了广阔的空间,如飞行器的导航、空中交通管制、地空数据通信、飞行器防撞、测距和着陆等,这些系统均建立在无线电电波的基础之上。电磁波传输数据和探测信息具有快速、可靠和距离远等优点,但也存在电磁波相互之间的干扰问题。随着航空流量和容量的高速增长,飞行器数量的增加和地面无线电设备的

广泛使用,无线电技术的应用呈现多样化的趋势,不同电子系统发射的各种频段的电磁波共存于相同的空间,使某些区域尤其是机场附近的电磁环境十分复杂,电子系统之间的相互干扰日趋严重。

在这些电子系统中,1 030/1 090 MHz频率的应用尤为广泛。电子系统按询问和应答的方式工作,以1 030 MHz为上行频率,1 090 MHz为下行频率,信号3 dB带宽一般在 ± 3 MHz以内,例如,A/C模式和S模式就是建立在这两个频点的地空数据链^[1]。使

* 收稿日期:2012-09-22;修回日期:2013-01-16 Received date:2012-09-22;Revised date:2013-01-16

基金项目:国家自然科学基金面上项目(61079006);国家自然科学基金重点项目(61139003)

Foundation Items:The National Natural Science Foundation of China(No.61079006,61139003)

** 通讯作者:whtoy@163.com Corresponding author:whtoy@163.com

用1 030/1 090 MHz频率的电子系统包括二次监视雷达、空中防撞系统、多点定位系统、自动广播相关监视系统、敌我识别器和测距仪等。多种系统的共享带来一系列问题:各系统的运行是否存在风险?现有的1 030/1 090 MHz信号环境如何?未来可能是什么状况?频谱拥塞和干扰的程度如何?如何规避干扰和缓解拥塞?怎样评估 ADS-B 等新系统大规模应用后的性能和影响?等等。围绕这些问题,欧美发达国家开展了长期的频谱监测工作,对未来 10~30 年新系统应用的影响和性能进行了可信的评估,国际民航组织(ICAO)、美国联邦航空局(FAA)和欧控等权威民航组织合作,对世界上最繁忙的机场,如法兰克福机场、肯尼迪机场等进行了全面的监测和评估^[2-3]。美国评估的结果是,到 2020 年和 2035 年其 1 090 MHz 频率将不能满足需要,因此其 ADS-B 同时采用了 1090ES (Extended Squitter) 格式和 978 MHz 的 UAT (Universal Access Transceiver) 格式。我国在该领域的研究和试验还是空白,对新系统应用的计划和实施标准的决策缺乏科学依据,随着航空流量的快速增长,空中交通密度的增加,1 030/1 090 MHz 频谱共享的问题将逐渐暴露,影响航空安全和运行效率。

本文是研究 1 030/1 090 MHz 频谱监测与评估的论文之一,着重讨论有哪些使用该频点的电子系统,介绍了各系统的基本运行方式,使用该频点的频度如何,并分析了 1 030/1 090 MHz 应用中的各种干扰形式。

2 主要电子系统

2.1 二次监视雷达系统

二次监视雷达或二次雷达^[4-5]是当前民用航空空中交通管制的主要监视设备,由地面雷达发射 1 030 MHz 的询问信号对飞机进行询问,机载应答机在收到询问信号后加载编码或高度等信息后发射应答信号。不同于一次雷达接收的信号是目标的回波信号,系统有两次收发,因此称为二次雷达。二次雷达分为常规体制和单脉冲体制,询问信号有 6 种格式,询问信号包含 P1、P2、P3 3 个脉冲,不同格式的 P1~P3 脉冲间隔不同,如表 1 所示,对应 6 种询问格式,应答信号的数据有不同的含义。其中 Mode A/C 为民用,Mode 3/A 为军民共用。由于 Mode A/C 只有 4 096 种编码,不能为每架飞行器分配唯一的编码,同时,A/C 模式没有选择性询问和应答功能,

随着目标数量对增加,干扰问题十分严重。在 A/C 模式之后发展了 S 模式数据链^[6],目标编码增加到 24 位,通信能力显著提高,且可以对特定目标点名呼叫,选择性询问和应答,从体制上降低了发生干扰的概率。

表 1 SSR 询问信号制式
Table 1 Signal modes of SSR interrogator

模式	P1~P3 脉冲 间隔/ μs	用处	使用对象
1	3	识别	军用
2	5	识别	军用
3/A	8	身份	民用/军用
B	17	未使用	民用
C	21	高度	民用
D	25	未使用	民用

那么,二次雷达使用 1 030/1 090 MHz 频率的程度如何呢?这里以雷声公司的 Conder series 300 二次雷达为例进行讨论。该雷达的探测距离大于 460 km,探测范围内飞机发射的应答信号都可能收到,发射信号脉冲重复频率 50~450 Hz,主波束 3 dB 宽度 2.4°,天线转速 5~15 r/min,360°扫描范围内可同时监视 1 400 个目标,主波束内可同时监测 32 个目标,检测概率均高于 99%,和通道旁瓣抑制比 28 dB,差通道旁瓣抑制比 26 dB。因此,单部二次雷达每秒发射的 1 030 MHz 询问信号可达 450 次,其旁瓣信号在距雷达安装位置较近的机场也可能被收到。应答信号的数量远多于询问信号,按主波束监测 32 个目标计算,单部雷达的最大应答次数可进行估算,这里假定为 A/C 模式,没有选择呼叫和应答功能,而是全部应答,PRI 为应答的重复频率, Δt 是目标被雷达主波束照射到驻留时间,

$$\Delta t = \frac{\theta_{3\text{dB}}}{(v_r/60) \cdot 360} = \frac{\theta_{3\text{dB}}}{6v_r} \quad (1)$$

式中, v_r 单位为 r/min,取最小值 5 r/min 时, $\Delta t = 0.08$ s。设主波束内监视的最大目标数为 N ,脉冲重复频率为 f_p ,则有最大应答次数 $R_{\text{max}} = N \times f_p \times \Delta t = 1 152$ 次。

A/C 模式应答信号时长为 20.3 μs ,1 152 次 A/C 模式应答信号总长度为 0.023 μs ,均出现在驻留时间 0.08 s 内,而实际的信号并不是邻接的,其重叠概率更大。这是假定目标全部为 A/C 模式的情况,若应答信号为 S 模式,重叠概率因选择性呼叫而减少,但 S 模式全呼叫时,重叠概率也较高。实际应用中,监视范围内目标数量达不到 1 400 个,主波束内目标也达不到 32 个,信号密度会有所减少。由于雷达作用距离

超过 460 km,因此必然收到其他询问机的应答信号,产生异步干扰(FRUIT),Conder series 300 在主波束内可承受的 FRUIT 干扰不超过 11 600 次/秒。

二次雷达的技术已非常成熟,采用了窄波束询问、旁瓣抑制、编码询问、全呼应答控制和飞行管制等技术来降低发生干扰的概率,但其他使用 1 090 MHz 频率的电子系统,却不可避免要受到高密度的二次雷达应答信号的干扰。

2.2 自动广播相关监视系统

自动广播相关监视 ADS-B 系统包括 ADS-B IN 和 ADS-B OUT 服务,未来将替代二次监视雷达成为飞行器监视的主要手段。ADS-B 通过机载 GPS 接收机定位其经纬度,再加载飞机的编码、高度、速度、飞行意图和其他飞行数据后,以 Mode S extended squitter 格式向地面广播。下行频率 1 090 MHz,广播频率 0.5 ~ 6 Hz。ADS-B 是美国国家航空计划 NextGen 的重要组成部分,FAA 自 2006 年开始执行 ADS-B 第一阶段的计划,目前已进入第二个阶段,已在部分航线上验证,将于 2015 年起执行第三阶段的计划,全面使用 ADS-B 系统^[7]。欧洲也将在 2015 年全空域使用 ADS-B。我国的近期规划主要开展 ADS-B 的运行试验与验证,实现基本覆盖 - 高空主要航路单重覆盖、终端区多重覆盖以及在多个西部无监视机场实现场面覆盖,目前已在成都 - 拉萨、成都 - 九寨沟等航线上试用^[8],2030 年之前的中期和远期规划也已出台。美国在实施 ADS-B 1090ES 数据链的同时,推出了 978 MHz 的 UAT 数据链,一方面是由于 ADS-B 无法满足飞行情报服务(Flight Information Services-Broadcast, FIS-B)和空中交通情报服务(Traffic Information Services-Broadcast, TIS-B)的上行广播电文需求,另一重要原因就是为减轻 1 090 MHz 频点的拥塞,飞行高度在 5 486 m 以下的通用航空飞行器将主要采用 UAT 数据链。中国国家航空局的近期和远期规划中没有提及 UAT 数据链,ADS-B 将是我国远期规划的主要监视手段^[9]。ADS-B 对其他系统的干扰由目标数量、广播频率和作用距离决定,但受到 1 090 MHz 同频干扰时,却没有二次雷达的多种干扰抑制手段。

2.3 多点定位系统

多点定位(Multilateration)系统^[10]是实现 A-SMGCS(Advanced Surface Movement Guidance and Control System)机场场面监视的核心技术,包括多部接收机构成的远端站和数据处理中心站两大部分。接收机在获得目标的到达时间 TOA 后,与解码数据一

起发往中心站,中心站根据时标和编码匹配目标,然后按照双曲线/面定位的原理,解算出飞机的位置。多点定位系统无需加载新的机载设备,而是借助现有的二次雷达应答信号、ADS-B 广播信号和 TCAS 信号监视飞机,多点定位是继二次雷达之后的重要监视手段,在 ADS-B 全面实行之前将发挥重要作用,在 ADS-B 实行只有也将是重要的增强监视手段之一。GPS 卫星属于美国,从国家安全角度来看,多点定位系统对我国具有更加重要的意义。

多点定位系统主要接收信号,在系统定标、同步误差校正和触发受严重干扰的目标应答时才发射询问信号,因此对 1 030/1 090 MHz 频点信号密度的增加影响较小。但是,ICAO 要求多点定位系统同时监视的目标数量大于 500 个,场面监视精度优于 7.5 m,检测概率大于 99.9%,因此,多点定位系统对 1 090 MHz 信号受干扰的程度十分敏感,严重的干扰可能导致多点定位系统失效。

2.4 空中防撞系统

空中防撞系统(TCAS)^[11]是避免空中飞机相撞的机载电子系统,在欧洲称为 ACAS(Airborne Collision Avoidance System),主要由询问器、应答机、收发机和计算机组成。TCAS 的询问器发出询问信号,当其他飞机的应答器接收到询问信号时,会发射应答信号,由此确定飞机的航向和高度,使飞机之间可以显示相互之间的距离间隔和高度,为驾驶员提供信息和警告。TCAS 使用二次雷达相同的应答信号格式,但独立于地面设备。目前广泛使用的是第二代空中防撞系统(TCAS II),TCAS II 用声音及显示警告飞行员,称为 Resolution Advisory,还可用语音指示避撞的动作。TCAS 的监视范围一般为前方 30 n mile,上、下方 3 000 m,为了减少无线电干扰,对发射功率作了控制,侧面和后方的监视距离较小。TCAS 可跟踪 45 架飞机,询问频率是 1 Hz,因此,对 1 030/1 090 MHz 频点的占用主要取决于目标数量。在 TCAS II 之后提出的 TCAS III 和 TCAS IV 对防撞系统的功能作了增强,但 TCAS IV 已被 ADS-B 替代,而 TCAS III 也没有付诸应用。最新的 TCAS 设备在性能上已有所提高,如 Honeywell 的第三代处理器 TPA-100,可跟踪 100 n mile 外的目标,并接收 ADS-B 信号。

2.5 敌我识别系统

敌我识别器(Identification of Friend or Foe, IFF)是一种身份识别系统,用于区分敌方、友方和己方飞行器,也是一种二次雷达,按照询问和应答的方式工

作,使用的上下行频率也是1 030/1 090 MHz。但数据链格式采用表1的 Mode 1、Mode 2、Mode 3/A 和 Mode 4,其中 Mode 3/A 为军民共用,Mode 4 为加密格式。目前,北约集团主要应用的是 MKX II 敌我识别系统^[12-13],在1999年后,各国陆续将 S 模式引入新开发的敌我识别系统,也称为 Mode 5,是加密格式的 S 模式,2004 年北约完成了 Mode 5 的统一设计和原理样机研制。Mode 5 有 4 级工作模式,分别为 Level 1、Level 2、Level 3 和 Level 4,不仅具有改进的询问/应答识别方式,还增加了态势感知、选址询问、数据传输以及空对地识别等功能。由于 IFF 是二次雷达的工作模式,因此,民航二次监视雷达存在的干扰问题,在 IFF 系统中也同样存在。

2.6 其他

ADS-B 相近的还有寻址式自动广播相关监视 (Automatic Dependent Surveillance-Addressed, ADS-A),也称为合约式自动广播相关监视 (Automatic Dependent Surveillance-Contract, ADS-C),通过点对点寻址签署了数据接收协议的地面接收机。ADS-A 主要应用在 FANS (Future Air Navigation System) 系统、海洋和偏远的内陆地区等。

ADS-B 不仅用于空中目标的监视,也被扩展到地面目标的监视。国外的公司已研制出车载 ADS-B 收发系统,如法国 Thales 公司研制的基于 ADS-B 的车辆跟踪器 (Vehicle Tracking) MOSQUITO。北京航通公司也研制出了 ADS-B 车载应答机 ABAV6215。地面目标发射的定位信号将进一步增加 1 030/1 090 MHz 频点的拥挤程度,而在机场这样的重点区域,信号密集程度非常高。

测距仪 (DME) 是在 IFF 基础上发展起来的测距设备,用于测量飞行器和导航台之间的斜距,通常与仪表着陆系统结合在一起使用。与二次雷达相反,DME 由机载设备发射询问信号,地面设备发射应答信号。询问信号频率为 1 025 ~ 1 150 MHz,应答频率为 963 ~ 1 213 MHz,均划分为 126 个信道,应答频率与询问频率始终相差 63 MHz。因此,DME 电子系统仍然占用了 1 030/1 090 MHz 频率,其 126 个信道的信号与 1 030/1 090 MHz 频点距离较近,在滤波器通带内的信号直接干扰了该频点的正常使用。

此外,交通信息广播服务系统 (TIS-B) 是未来可能付诸应用的一种交通信息广播服务系统,该系统基于二次雷达二次雷达的询问与应答模式来探测和定位飞行器,然后通过 ADS-B GBT (Ground Based Transceivers) 发送给装有 ADS-B 设备的飞行器。因此,TIS-B 系统也在使用 1 030/1 090 MHz 频率。

3 干扰分析

从以上分析可以看到,多种电子系统均在使用 1 030/1 090 MHz 频谱,当信号出现在同样的空域时,接收机将收到来自其他系统的发射信号,信号间容易相互混叠,产生漏检或虚警,导致系统工作不稳定。不仅如此,信号在空间传播过程中,受地形及建筑物影响,产生多径效应,非直达信号也会对有用信号带来干扰。下面分析以下几类主要的干扰形式^[4,14]。

(1) 异步干扰

异步干扰 (False Replies Unsynchronized with Interrogator Transmissions, FRUIT) 即应答接收机收到其他询问机询问引起的应答。随着空中和地面目标的增加,各种电子系统共用 1 090 MHz 下行频率,应答机收到 FRUIT 干扰的频率很高,如果连续几次收到同一目标的 FRUIT 信号,容易判决为一个新的目标出现,导致虚警的产生。FRUIT 是主要的干扰形式,在二次雷达系统中要求承受的 FRUIT 干扰为每秒 5 000,而雷声公司最新的二次雷达在主波束内可承受的 FRUIT 干扰已提高至 11 600 次/秒,而多点定位系统的设计目标则达到 40 000 次/秒。

(2) 同步窜扰 (Synchronous Garble)

一部询问机引起多部应答机同时应答,应答脉冲组相互重叠,且脉冲位置相互占用的应答。混扰是不同应答机的射频信号在空间合成,主要发生在距应答机斜距相当的目标之间。同步窜扰的抑制尤为困难,因为信号在时域、频率均重叠在一起,一般用阵列天线接收,利用信号空间方向的不同来分离混叠的信号。

(3) 窜扰 (Garble)^[15]

也称为交织应答 (Interleave reply),与混扰的机理相似,应答脉冲组相互重叠,但脉冲位置不相互占用的应答。对这种干扰,最简单的方法就是增加询问次数,期望多次应答信号中有未受干扰的应答,但这种方法又会增加对其他应答机的干扰。

(4) 反射假目标 (Ghost)

应答信号受地物反射,尤其是大型建筑物和地形的反射引起的假目标,这种干扰与真实目标很难区分,并导致测距的错误。

(5) 多径 (Multipath)

从多种路径达到接收机的信号,表现为信号之后有较长的拖尾,部分脉冲变形,数据解码出现错误。

(6) 标锁定 (Target Lockout)

当两个询问机询问同一目标的时间很近时,由于应答机在响应期间,不能应答其他应答机的询问,这

样后一部询问机收到的是另一部询问机对应的应答信号, 应答结果及时间基准不同, 导致错误的发生。

以上是主要的干扰形式, 对不同的电子系统还有特定的干扰形式, 如二次监视雷达中存在的二次环绕和群俘获问题。

4 结束语

1 030/1 090 MHz 频谱在民用及军用航空领域有多种应用, 这些电子系统同时工作, 共享该频点, 必然造成相互的干扰, 这种干扰随目标数量的增加而增强, 并成为限制飞行器数量、影响航空系统正常运行的因素之一。除该频点以外, 在 1 030/1 090 MHz 频点附近的频段也广泛使用, 如 GSM 个人移动通信的上下频率为 890 ~ 915 MHz, 下行频率为 935 ~ 960 MHz, 大量的手机发射信号及其频谱泄漏信号也可能干扰航空电子系统的正常工作, 因此, 在乘坐飞机的过程中, 乘客使用手机及无线设备仍受到限制。本文概述了 1 030/1 090 MHz 频点在二次雷达、ADS-B、多点定位、TCAS、IFF 等系统中的使用状况, 对信号的主要干扰形式进行了分析和介绍。因此, 无论是保障现有系统的正常工作, 还是论证未来 ADS-B 等新系统大规模应用的可行性, 都有必要掌握 1 030/1 090 MHz 信号的环境和承载能力, 对 1 030/1 090 MHz 频谱开展监测试验和评估试验, 为新系统的规划和标准的制定提供科学的决策依据。1 030/1 090 MHz 频点的监测方法、监测数据分析方法、评估建模技术、应用系统性能评估方法、拥塞规避措施、干扰背景下的增强接收技术和抗干扰技术等将在后续的论文中进一步分析和阐述。

参考文献:

- [1] Annex 10 to the convention on international civil aviation, Surveillance radar and collision avoidance systems[S].
- [2] Chludzinski B J, Drumm A C, Elder T R, et al. Lincoln Laboratory 1030/1090 MHz Monitoring March-June 2010 [R]// ATC - 390. Lexington: MIT Lincoln Laboratory, 2011.
- [3] Panken A D, Harman W H, etc. Measurements of the 1030 and 1090 MHz Environments at JFK International Airport. [R]. Springfield: Lincoln Laboratory, 2012.
- [4] ICAO. Manual on the secondary surveillance radar system [M]. Brussels: ICAO, 2004.
- [5] MH/T 4010 - 2006, 空中交通管制二次监视雷达设备技术规范[S].
MH/T 4010 - 2006, Technical standards for ATC secondary surveillance radar[S]. (in Chinese)
- [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, WANG Xue-gang. Mode S

for secondary surveillance radar (SSR): an introduction and overview[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(7): 113 - 118. (in Chinese)

- [7] Arbuckle P D. U.S. Activities in ADS-B Systems Implementation[C]// Proceedings of 2011 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communication - Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles. Capri, Italy: IEEE, 2011: 41 - 46.
- [8] 康南, 刘永刚. ADS-B 在我国的应用与发展[J]. 中国民用航空, 2011, 131(3): 36 - 38.
KANG Nan, LIU Yong-gang. Application and development of ADS-B technology in China[J]. China Aviation, 2011, 131(3): 36 - 38. (in Chinese)
- [9] 中国民用航空局. 中国民航监视技术应用政策[R]. 北京: 中国民用航空局, 2010.
CAAC. Policy of aviation surveillance techniques of China [R]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2010. (in Chinese)
- [10] 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.
LV Xiao-ping. Discussions on the applications of MDS technology in civil China aviation[J]. Air Traffic Management, 2006, 23(9): 4 - 11. (in Chinese)
- [11] FAA. Introduction to TCAS II[M]. Washington: FAA, 2000.
- [12] 曹晓蓓. 综合敌我识别方法研究[J]. 电讯技术, 2011, 51(12): 1 - 3.
CAO Xiao-bei. Study on Integrated IFF Technology [J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(12): 1 - 3. (in Chinese)
- [13] 兰鹏. S 模式与军用敌我识别[J]. 电讯技术, 2006, 46(3): 139 - 143.
LAN Peng, Mode S and Military IFF [J]. Telecommunication Engineering, 2006, 46(3): 139 - 143. (in Chinese)
- [14] 钟琼, 吴援明, 黄成芳. 二次雷达系统干扰等问题的解决方法[J]. 电讯技术, 2005, 45(2): 138 - 142.
ZHONG Qiong, WU Yuan-ming, HUANG Cheng-fang. Solutions to Some Problems in a Secondary Surveillance Radar System [J]. Telecommunication Engineering, 2005, 45(2): 138 - 142. (in Chinese)
- [15] 王法灏, 王运锋. 二次雷达同步窜扰分析及解决方法[J]. 电讯技术, 2009, 49(5): 14 - 16.
WANG Fa-hao, WANG Yun-feng. Analysis of Garble in Secondary Surveillance Radar(SSR) and its Solutions [J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(5): 14 - 16. (in Chinese)

作者简介:



王洪(1974—), 男, 四川人, 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达信号处理、MIMO 雷达、多点定位、数字接收机和高速实时信号处理。

WANG Hong was born in Sichuan Province, in 1974. He is now an associate professor with the Ph.D. degree. His research interests include radar signal processing, MIMO radar, multilateration, digital receivers and high speed and real-time signal processing.

Email: whtoyou@163.com