

内部使用

跳频信号捕获与测向 专题材料

四川成都 393 信箱 104 号

二〇〇二年四月

前 言

跳频通信经过 20 世纪 70 年代的开发、80 年代的推广、90 年代的普及，目前全世界大多数国家的军队都陆续换装新型跳频电台。在此形势下，各国的信号情报侦察和电子战部门以及一些国防产品生产厂商都下大力气开发跳频通信捕获与测向设备，一大批具有跳频信号侦测功能的先进测向设备问世。

本专题材料的主要目的就是介绍国外对有关技术和装备的开发研制和生产情况，共收集和编译了 25 份材料，分为五个部分，第 1 篇文章综合介绍国外跳频通信及跳频信号侦测设备的发展情况；第 2~5 篇文章为选译的国外论文，主要讨论跳频信号侦测技术；第 6~9 篇文章是已在本所刊物上发表过的相关技术论文；第 10~18 篇文章介绍国外生产的 9 种跳频信号侦测设备；第 19~25 篇文章直接从一些难得会议录上选择了 7 篇较新的测向技术英文文献。

本书的材料难得，主要来源于难得会议录、国外期刊和因特网，对于全面了解国外跳频信号侦测设备的开发研制现状，学习有关技术有较大参考作用，可供科研人员、科研管理人员及其他相关人员阅读。

编者

二〇〇二年四月

目 录

综述

国外跳频信号捕获与测向设备发展现状(编写)	1
-----------------------------	---

国外论文

短波宽带多波道测向系统中使用的信号检测与跟踪算法	11
利用短波宽带测向系统对跳频台进行定位	16
采用快速傅里叶变换(FFT)的测向接收机	22
用搜索接收机截获跳频信号的可能性	28

本所论文

关于跳频信号侦察体制捕获概率的研究(1996年6月发表)	40
一种短波信号侦察收方案(1997年4月发表)	48
扩频低截获率信号的检测技术(1997年10月发表)	52
数字信道化技术在跳频信号侦察中的应用(2000年1月发表)	61

国外跳频侦测设备介绍

数字扫描测向机 DDF0xS	71
数字监视测向机 DDF0xM	78
FFT 宽带测向系统 MRD3000W5	84
SIGMA II 机动测向系统	87
FFT 宽带测向系统 Polygon MRD 4008	90
美 Zeta 公司的新一代截获和测向系统	93
Model 803VHF/UHF 信号捕获、监视和测向系统	97
RDF-2001 宽带无线电测向机	102
VHF/UHF 宽带测向机 DFP7107	104

最新测向文献（英文）

在短波段使用一个紧凑的测向系统进行发射源分离·····	106
实现超分辨测向技术的一种快速有效的方法·····	110
基于同址天线的短波紧凑测向系统的设计·····	114
对未知极化的短波信号进行超分辨测向·····	119
巴特勒矩阵测向机的频域实现·····	124
脉内分析与测向用的多信道接收机·····	128
基于单脉冲概念确定到达方向·····	132

国外跳频信号捕获与测向设备发展现状

平良子

摘要: 在高技术战争中,人们为了取得信息优势,确保信息的安全传输,低截获概率技术(LPI)在通信中的应用日益普及,跳频通信是一种应用最广的低截获概率技术。在跳频通信技术快速发展的同时,各国的信号情报部门和电子战部门高度重视对跳频信号的侦测与侦收问题,一些国防产品生产厂商看到了这一领域的广大市场,纷纷投入大量人力物力,经过30年来的努力,一批跳频信号侦测设备相继问世,跳频信号的侦收系统也在暗中大力开发当中。本文首先介绍了跳频通信的当前水平和发展趋势,然后介绍跳频通信侦测设备的开发研制情况,最后简单介绍了最常用的跳频测向方法。

关键词: LPI 跳频 跳频测向

1 低截获概率(LPI)通信

低截获概率(LPI)技术属于通信传输安全措施。在高技术战争中随着C⁴I对抗的加剧,人们为了达到取得信息优势的目的,确保信息的安全传输,LPI技术在通信中的应用日益广泛。

通信中的低截获概率技术(LPI)讲的是己方的通信尽可能的不被敌方截收,这在电子战领域又称为电子反对抗措施(ECCM),即通信受到威胁(可能被干扰或截收)的一方为保护自己通信的通畅而采用的反对抗措施。对这两个术语加以说明的原因是,在介绍跳频通信捕获与测向设备时,经常会遇到这两个词。在跳频通信设备中,它们即是跳频的代名词,但实际上它们的含意要广得多。以下几种技术均可以看作为低截获概率技术:

扩频通信 包括跳频、直接序列扩频、跳时和脉冲调频等,它们是将信号能量扩展到很宽的频带上,功率谱密度大大降低,甚至淹没在噪声之中,用传统的接收设备无法截收。跳频是发射频率在伪随机码控制下在特定的频率范围内跳变,直接序列扩频是用一个伪随机序列对信号进行相位调制,从而使信号分散在很宽的带宽上,使每条信道上的平均信号强度几乎与噪声没什么区别。脉冲调频也叫线性调频,是发射频率连续地线性或非线性变化,应用场合较少。跳时是信号发射的时间是随机的,较少单独使用。

突发通信 突发通信是将信息压缩后,在很短的时间内将信息发出,发射时间和频率对截收方而言都是未知的,因而具有一定的隐蔽性,多用于潜艇向岸基站或向其他平台的发信。

短波自适应选频也具有一定的低截获概率特性,短波自适应选频的主要目的是提高通信质量。但由于通信中频率自适应改变,无形中给截收方带来一定

的困难。

除了上述低截获概率技术外，凡是能防止或减少被敌方截收的其他技术，也都可以算是低截获概率技术，比如天线波束调零，将天线波束零点指向可能被敌方干扰或截收的方向。再比如有意采用某种近距离通信，在这个距离之外的敌方就无法截收。

在上述低截获概率技术当中，在战术通信中应用最广的是跳频。

2 跳频通信的发展

在战术通信中，跳频通信是作为一种抗干扰和抗截收/测向的电子反对抗手段而发展起来的，目前，这种电子反对抗措施的使用日趋普及，给传统的侦察测向设备带来很大困难。跳频通信经过 20 世纪 70 年代的开发、80 年代的推广、90 年代的普及，目前全世界大多数国家的军队都陆续换装这种新型电台，成为一些国家军用通信电台的制式装备。进入 90 年代之后，各国军队陆续进行战术电台的换装，逐步由新型的跳频电台代替老式的固定频率电台。地面部队对 VHF 跳频电台应用最广，这种电台的普及率较高；机载和舰载平台多使用 UHF 频段跳频；短波跳频电台也在不同的场合获得一定程度的应用。预计进入 21 世纪之后，跳频电台的应用还会有惊人的增加。

目前，美军的跳频通信已达到相当普及的程度，主要有四大体系（见表 1），台湾当局也从不同国家陆续引进了一些跳频设备（见表 3）。从海湾战争和科索沃战争中看出，英、法、德等国家的军队也都普遍使用了跳频通信。表 2 和表 4 给出了美国和其他一些国家生产的较新跳频电台。

表 1 美军应用最广的四大跳频体系

名称	应用	跳速	工作频段	美军采购数量
SINCGARS	陆军和海军陆战队战术通信电台	100 跳/秒	VHF	大约 20 多万部
JTIDS	飞机、舰船和地面平台间数据信息交换	77,800 跳/秒 (38000 跳/秒)	L 频段	
Have Quick I / II	作战飞机通信	1000 跳/秒	UHF	15,000 部左右
EPLRS	陆军作战部队定位、导航和识别	512 跳/秒	UHF	6000 多部

表 2 美国几大公司生产的主要跳频设备

美国哈里斯公司视射频通信分公司						
型号	工作频段 (MHz)	信道数	输出功率 (W)	数据类型	数据率 (kb/s)	跳频体制和跳速
AN/PRC-117F	30-512	100	20	模拟和数字	64	SINCGARS 和 Have Quick II
AN/PRC-150(C)	1.6-60	未知	最大 20	模拟和数字	2.4 (9.6)	跳频

RF-5000	1.6-30	100	最大 1000	模拟和数字	4.8	跳速 20 跳/秒
RF-5800H-MP	1.6-60	75	最大 20	模拟和数字	9.6	串音 ECCM 波型
RF-5800M-MP	30-512	100	最大 20	模拟和数字	64	Quicklook1A 或 Have Quick II
RF-5800V-HH	30-108		最大 5	模拟和数字	16	Quicklook1A
RF-5800V-MP	30-108	10Hz 步进	最大 10	模拟和数字	64	300 跳/秒
美国 ITT 工业宇航通信公司						
SINCGARS ASIP VRC-87E	30-87.975	6	4.5	模拟和数字	可到 1.6	跳频
罗克维尔柯林斯公司						
AN//URC -138 (V)						JTIDS 终端
MIDS-LVT						JTIDS 终端
AN/ARC-210	30-400	14,240	10-23	模拟和数字	可到 80	SINCGARS/ Have Quick
AN/GRC-171 系列	225-400	7000	最大 50	模拟和数字	可到 25	Have Quick
罗克维尔柯林斯公司政府系统分公司						
AN/ARC -150(V)8	2-30	280,000	400	模拟	9.8	可选 ECCM
ARC-220	2-30	280,000	175	数字	5.8	可选 ECCM
ARC-230	2-30	280,000	400	数字	19.2	可选 ECCM
HF-9000D	2-30	280,000	200	模拟和数字	9.6	可选 ECCM
HF-950D	2-30	280,000	400	模拟和数字	9.6	可选 ECCM
VRC-100	2-30	280,000	175	数字	9.8	可选 ECCM
雷声系统公司						
EPLRS 增强型 定位报告系统						512 跳/秒
AN/ARC-164	225-400	7000	10-12			Have Quick
AN/ARC-222 机载	30-90					SINCGARS

表 3 台湾的跳频通信设备

设备	跳速	应用	附注
SINCGARS VHF	100 跳/秒	陆军	
BAMS VHF	250 跳/秒	陆军	从比利时进口
AN/GRC-512 (V) UHF		海军陆战队	从加拿大马可尼公司进口
AN/ARC-164(V) UHF		空军	属于 Have Quick 电台, 台湾所进设备是否有跳频功能待查
AN/GRC-171 (V) UHF		空军	属于 Have Quick 电台, 台湾进口设备是否有跳频功能待查

RF-5000	HF	20 跳/秒	国防部	
JTIDS	L		预警机	美国国防部已同意卖给台湾

表 4 其他国家的跳频电台

型号	工作频段 (MHz)	信道数	输出功率 (W)	数据类型	数据速率 (kbps)	
以色列 Elta 电子工业公司						
ARC 740	108-156 225-400	未知	20	模拟和数字	未知	跳频
南非 Grintek Comms 公司						
TR2400	1.6-30	100	最大 100	模拟和数字	4.8	跳频 跳频
TR2600	1.6-30	100	最大 125	模拟和数字	4.8	
德国 R/S 公司						
MR3000H	到 15	10,000	20	模拟和数字	可达 64	跳频
MR3000U	到 25	10,000	10	模拟和数字	64	跳频
法国 Thales 通信公司						
MBITR	30-512	100	可到 5	数字	未知	跳频
PR4G	30-88	2320	可到 50	数字和模拟	16	跳频
系统 3000	1.5-30	100	20	数字和模拟	5.4	跳频
TRC-5101	30-88	100	未知	模拟	可到 4.8	有
TRC-5102	30-88	100	未知	模拟和数字	可到 4.8	有
英国 Thales 国防公司						
黑豹 ERD /P	30-88	未知	未知	数字	9.6/16	跳频
黑豹 H	1.5-30	100	可达 100	模拟	3.6	跳频
黑豹 P	30-88	2320	可达 500	模拟和数字	16	跳频
黑豹 V	30-108	3120	可达 100	数字	16	跳频

从目前所报道出来的一些设备的简单介绍，看出跳频通信的主要发展趋势是：

(1) 跳速向高速方向发展

在 VHF 频段，20 世纪 70、80、90 年代出现的一些跳频电台跳频速率大多在 500 跳/秒以下，没有大的变化，比如 SINCGARS（美国）跳速 100 跳/秒，Jaguar V（英国）跳速 50-500 跳/秒，PR4G（法国）跳速 400 跳/秒，TRC-950（法国）跳速 300 跳/秒，HYDRA/V（意）跳速 400 跳/秒，BAMS（比利时）跳速 250 跳/秒。

在 UHF 频段，据报道，美军使用的 Have Quick 跳频系统跳速在不断提高，Have Quick II 和 II A 的跳速比 Have Quick I 有所提高。有关材料反映，Have Quick II A 的跳速为 1000 跳/秒。

在 L 频段, JTIDS 较早报导出来的跳速是 38,000 跳/秒, 但最近因特网上反映, JTIDS Klass 2 终端跳速为 77,000 跳/秒, 这可能是先后出现的设备技术规格有所变化。

在短波频段, 目前的跳频设备跳速一般都在 50 跳/秒以下, 而以 20 跳/秒居多, 比如 RF-5000 (哈里斯公司), 但已提出和实验了短波高速跳频系统, 90 年代初, 美国休斯公司进行了短波 2560 跳/秒跳频通信系统 (HF2000) 实验, 洛克希德·桑德尔公司于 95 年完成跳频增强型 (CHESS) 短波电台, 跳速每秒变换 5000 个频率。这两种短波设备都打破了目前短波低速跳频的惯例。不过, 这种短波高速跳频系统目前仍处在实验研究阶段, 未见到有实用产品问世。

提高跳频速率是提高抗干扰能力的一个有力措施, 无疑也会给对跳频信号的侦测带来更大的困难。

(2) 实现方法的软件化

当前有些先进的跳频电台, 其跳频功能是用软件实现的, 这样, 一些跳频参数的设置与改变就相当简单而容易, 比如跳频波型、跳频图案、跳速、跳带、频率点数的选择等都可以通过参数的设置来实现, 这样一来, 对跳频信号的截获与测向就更加困难, 在战术环境下实现对信息内容的获取, 其困难是可以想象得到的。

(3) 功能综合化

当前战术电台的一个发展趋势就是开发软件电台, 实现多频段多功能的综合。在跳频电台方面, 有的增加上 GPS 即可实现导航和定位功能。也有的增加了敌我识别功能, 有利于对战场态势的掌握。还可以用跳频电台实现高速数据传输和话/数同传, 用跳频电台实现战场 INTERNET 连接, 等等。

3 国外跳频信号侦测设备发展概况

在跳频通信日渐普及的形势下, 如何发现和测定这些跳频信号的方向, 成为通信情报领域人们普遍关注并下大力气解决的问题, 这是目前、乃至今后相当长的一段时间内向侦察测向提出的一个很大的挑战。但是, 事物的发展历来是有矛即有盾, 在各国军方和国防产品厂商的共同努力下, 一大批能够对跳频和时短信号测向的侦察设备相继问世。

3.1 国外中低速跳频信号侦测问题已得到一定程度的解决

跳频通信的发展和广泛使用, 同时也促进了对跳频通信侦察和测向技术的发展, 经过 20 多年的努力, 目前, 在发展国家, 中低速 (每秒几百跳以下) 跳频信号的发现和测向问题技术上可以说基本上获得解决, 出现了一大批具有跳频侦测能力的测向机。表 5 列出了一些能够对付跳频信号的测向系统。

从表 5 可以看出:

(1) 西方主要发达国家均有跳频测向产品问世, 从厂家对产品的介绍可以看出, 跳速在 1000 跳/秒以下的跳频信号测向问题已获得一定程度的解决。当

表5 跳频信号测向系统

生产厂家 型号	工作频段 (MHz)	测向 方法	灵敏度 ($\mu\text{V/m}$)	准确度	单次取向 时间	搜索 速度	说明
德 R/S 公司 PA 2000	2-512	沃森-瓦特	HF:4-10 VHF:2-6 UHF:6-20	1-2°	定频: 1ms; 跳频搜索 测向: 0.25-3s	1600 信道/s	是最早出现的 跳频台测向 机, 可对每秒 1000 跳的信号 测向
德 R/S 公司 DDF0xS 数 字扫描测 向机	0.5-1300	相关干 涉仪或 沃森-瓦 特	取决于所 用天线	0.5°		200 MHz/s	由四部测向机 构成 SCANLOC 测 向和定位系统
德 C.Plath DFP 5300	0.3-30	沃森-瓦特			取向速度 10 万次/秒		实时宽带测向 系统
德 C.Plath DFP 7107	20-1350	沃森-瓦 特或干 涉仪		2-3°	捕获时间 10ms	100 MHz/s	FFT 多信道测 向机
MRCM MRD3000 W5	20-3000	沃森-瓦 特或干 涉仪		1-2.5°	取向速率 1000 次/秒	1GHz/s	FFT 宽带测向 系统
MRCM* MRD4008 (即 VKP 4000)	0.5 -30MHz	沃森-瓦 特或干 涉仪	>-115dBm			100 MHz/s	FFT 宽带测向
MRCM* SIGMA II	20-3000			1-2.5°	可测大于 500 μs 的 信号	1GHz/s	
美 TCI Model 803	20-2700		10dB SNR	2°		20000 信道/秒	
美 Zeta ZS-2500(T)	20-1300		1.5-2.0 度		1,10,50ms 可选	1000 信道/秒	
美 ESL ES1500 和 ES2000	20-150 150-500 500-1200	双通道 干涉仪	5 8 12	1°	20 μs		采用数字相位 测量
无线电侦 察技术公 司 RDF-2001	0.01-30			1°		160 MHz/s	
罗克维尔 柯林斯 SDS	30-90	多普勒					只能对 100 跳/ 秒信号测向
法国汤姆 逊-CSF TRC-610	2-30 20-1350 2-1350		0.5-15	HF:2°	50 μs	1000 MHz/s	
法国汤姆 逊-CSF TRC-6100	0.3-3000	沃森-瓦 特或相 关法		0.5°		10 GHz/s	
意电子公 司 G-100	20-1000	双通道 干涉仪		1°	HF: 50ms 其他: 2ms	可测最 大跳速 400 跳/秒	

意电子公司 DELOS	VHF/UHF	干涉仪					车载
美雷声系统公司 AN/TSQ-199	3-30MHz						美陆军在用装备, 可对低检测概率信号测向
土耳其 DFINT-3T	20-1200	干涉仪		1.5°			

* MRCM 公司是由德国的 EADS (欧洲航空防御和空间公司) 与南非的 GRINTEK 公司共同组成的一家联合公司, 主要生产各种信号侦察和电子战产品。EADS 的前身为戴姆勒·奔驰航空公司, 再往前追则是最早的 AEG-Telefunken 公司。

然也不能完全说这里面没有厂家的吹嘘。所用测向方法大部分是沃森-瓦特和干涉仪体制, 主要依靠先进的数字信号处理技术, 使这些基本的测向方法发挥出其潜在的能力。

(2) 出现了一批具有跳频信号发现和测向能力的侦测合一系统

对跳频信号的发现和测向, 不能依靠传统的侦察和测向概念, 即由搜索接收机发现信号后再指挥测向机进行测向, 而必须使用侦察和测向合一的侦测系统, 即由同一部机器发现信号并测出方向。从上表中可以看出, 已经出现了一批同时具有跳频信号发现与测向能力的机器, 大家比较熟悉的有: 德国 R/S 公司的 PA 2000 测向机和 DDF0xS 数字扫描测向机、德国戴姆勒·奔驰宇航公司的 VKP-4000 测向机 (目前 MRCM 公司的 MRD4008)、德国 C.普拉特公司的 DFP 5300 测向机、美国 TRW 公司 ESL 分公司的 ES2000 测向机、法国汤姆逊公司的 TRC-6100 测向机等。在这些跳频侦测系统中, 以 PA2000 为代表的搜索测向体制和以 VKP 系列测向机为代表的 FFT 数字信道化体制是两种比较有效的跳频截获与测向方法, 后者较前者更胜一筹, 比较新的机器多采用这种体制。

PA 2000 的基本原理是将快速扫描与三通道沃森-瓦特测向技术相结合, 一边搜索, 一边测向, 能在 2 秒之内对 40MHz 范围内的所有信号测出示向度, 相当于 1 秒种 1600 个信道, 即 640 微秒完成一次换频测向。由 3-7 部 PA-2000 和相同数量的示向处理器, 再加上数据分析工作站及将它们相互连接起来的通信设备, 就构成了跳频截获与测向网 EA 2000。以 PA 2000 为代表的搜索侦测体制是 80 年代出现的, 无疑代表了当时最先进的截获与测向一体化体制, 当时出现的一些其他跳频侦察系统也大多采用这种体制; 但到了 90 年代初, 一种更为先进的跳频截获与测向体制, 即数字快速付氏变换 (FFT) 多信道体制获得广泛应用。这种体制的基本原理是将监视频段通过数字滤波器和 FFT 技术构成多条信道并行截获与测向, 典型代表就是德国戴姆勒·奔驰宇航公司生产的 VKP (德文多信道测向机的缩写) 系列短波测向机, 其中 VKP 4000 能同时对 2.4MHz (3 个 800kHz 的基础瞬时带宽) 带宽内的 19200 条 FFT 子信道进行监视, 能对这个带宽内同时收到的所有信号进行接收和测向。德国 C.普拉特公司也生产出同样采用这种原理的 DFP 5300, 可同时监视 800 条信道, 监视带宽可

在 10、25、50、100、200、400、800、1600KHz 内变化，可实现每秒 10 万个示向度的测向。同样，90 年代以后其他国家研制出来的截获与测向系统，也多采用这种体制。

3.2 跳频信号侦收还存在较大的困难

这里用侦收是指包括捕获、分类、识别、测向以及获取信息内容在内的整个过程。国外对跳频信号的侦收肯定是做了大量的研究，但确很少有产品报导，或许是还没有获得技术上的突破。对跳频信号侦察的主要困难如下：

a) 对于跳频信号，无线电侦察方不知道跳频图案，没有办法达到同步接收，很难跟上跳频信号的每一跳。

b) 战场上大量网台同时工作，如何进行区分是个难题。

c) 当前的先进跳频电台的参数可变性会给侦察方带来很大困难。新近开发的跳频通信设备，其跳频图案、跳频波型、跳速、跳带等参数都可进行设置，在战术环境下对这种参数可变的跳频台进行侦收其困难是不言而喻的。

d) 多种低截获概率技术组合采用，也会给跳频信号侦察带来新的困难。在同一通信系统中，同时采用几种扩频形式，比如 JTIDS 系统中，同时采用了直接序列扩频和跳频，在短波跳频电台也往往同时采用短波自适应选频，还有有的是跳频与突发通信相结合。

e) 跳频速率在向高速化方向发展，当前的侦测设备一般都声称可对跳速在 1000 跳/秒以下的跳频信号测向，是否能达到这个指标，尚待证明。如何对付跳速高达 77,800 的 JTIDS 信号，以及跳速高达 5,000 的短波高速跳频信号，更是侦测工作中遇到的一个更大的难题。对于高速跳频信号的侦收困难则更大。

4 测向方法介绍

当前跳频测向大多采用两种测向原理，即 Watson-Watt 测向和干涉仪测向。从测向处理和显示的角度看，最适用的跳频测向处理方法是多信道测向机。

(1) 数字式 Watson-Watt 测向方法

Watson-Watt 法的主要优点是能够无延迟的显示出示向度，并且在整个方位范围内有单脉冲能力，这正是对跳频测向需要的特性。

Watson-Watt 法的基本原理是：具有正弦和余弦方向特性的接收天线信号经放大和滤波之后加到一个阴极射线管的 x 和 y 偏转板，在理想情况下得到一个直线李沙玉图形，其偏角对应于电波方向，但有 180° 的模糊。所指示的角度由两个信号之比获得：

$$\hat{\alpha} = \arctan \frac{U_x}{U_y}$$

如果加上一个从全向接收天线得到的消隐信号，则可以得到不模糊的示向度显示。

如果由于环境干扰在 U_x 和 U_y 有相位移 δ ，则显示的图形是一个椭圆，椭

圆主轴的位置表示电波的入射方向，它可以由下式计算出来：

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{2} \arctan \frac{2|U_x||U_y|\cos\delta}{|U_y|^2 - |U_x|^2}$$

现代测向机不是在 CRT 上显示天线信号的中频电压，而是在比较宽的中频带宽上以数字方式同时对信号进行处理，其主要的选择性是借助于数字滤波器达到的，示向度由上面的方程进行数值计算后显示在带有图形用户接口的计算机上。这样作可以避免模拟测向机的很多缺点，这包括：

- 在滤波器边缘也能作到信道同步，
- 对天线网络和电缆的校正值考虑起来比较简单，
- 数字部分没有温度飘移，
- 可得到数字形式的示向度，便于做进一步处理，特别是容易传输到远地的处理站。

(2) 相关干涉仪测向机

干涉仪测向机通过测量由天线阵的各天线元在接收波前的不同点上接收信号的相位差而确定电波的入射角。

只有当天线元之间的间隔大于半个波长时，用三个天线元获得的方位角和仰角才是无模糊的。设 Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 分别为在三个天线元上测得的相位，则方位角的计算公式为：

$$\hat{\alpha} = \arctan \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Phi_3 - \Phi_1}$$

仰角计算公式如下：

$$\hat{\varepsilon} = \arccos \sqrt{\frac{(\Phi_2 - \Phi_1)^2 + (\Phi_3 - \Phi_1)^2}{2\pi\alpha/\lambda}}$$

实际上，三天线元配置一般通过进一步增加天线元进行加强，这样就可以使天线元间隔最佳地适应于工作频率范围，并使天线间隔大于半个波长，以便提高小基础测向系统的准确度。通常采用的天线排列形式包括直角等腰三角形和圆形阵。

相关干涉仪的基本原理是将测得的相位差与已知配置的测向天线系统在给定电波到达角下得到地相位差进行比较，这种比较是通过计算二次方误差或形成两组数据的相关系数而完成的。如果利用两个比较数据组的不同方位值，则由相关最大时的数据可以获得示向度。图 1 是相关处理的原理，它是以 5 单元的天线阵为例的：下边数据矩阵的每一列对应于一个电波角 α ，并形成一比较矢量，比较矢量的各单元表示这一入射方向的天线元之间的预计相位差。上边的 5×1 数据矩阵是当时的测量相位差（测量矢量）。

为了确定未知的入射方向，下边的参考矩阵的每一列通过逐个单元地对矢量进行相乘和相加而与测量的矢量相关，其结果是相关函数 $K(\alpha)$ ，它在比较

矢量与测量矢量一致性最佳时达到其最大值。与比较适量有关的角度则是所需的示向度。这种方法是波束形成算法的一种特殊形式。

(3) 多信道测向机

数字 Watson-Watt 和相关干涉仪测向法是跳频信号测向采用的两种基本原理,从处理和显示的角度看,最适合跳频测向的技术是多信道测向机,这在前面已经谈到。

多信道测向机是借助于数字滤波器 (FFT 和多相滤波器) 实现的。根据经费的不同,这种测向机允许在从 100kHz 到几 MHz 的带宽范围内准同时进行测向。通过扫描模式可以覆盖较大的频率范围。多信道测向机可提供如下显示模式:

- 测向值对频率
- 测向值对频率和时间 (对测向值利用不同的彩色)
- 电平值对频率 (功率谱)
- 电平值对时间和频率 (对电平值采用不同的彩色)
- 直方图

5 结束语

本文简单介绍了跳频通信的开发应用和跳频侦测设备的发展情况,应该说明的是,国外军方有关这方面的情况十分保密,一些国防厂商出于推销产品的目的,对它们的产品有一些介绍,但大都十分简单,核心的东西不会发表出来,鉴于此,本文所述内容十分皮毛,仅能提供一点思路,如有错误,请批评指正。

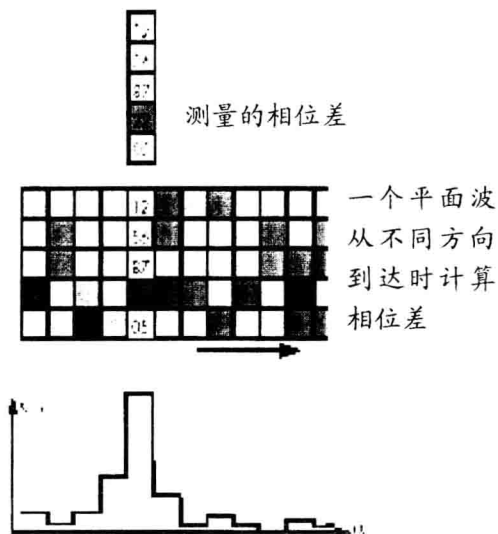


图 1 相关干涉仪处理原理

短波宽带多信道测向系统中使用的信号检测与跟踪算法

卢良安译 王开运校

摘要：本文描述了一种信号检测与跟踪算法，这种算法能用来处理测向（DF）系统中的宽带多信道数据。处理最终得到一系列发射信号及其基本特征参数，如频率、带宽、方位角和仰角。并详细介绍了各处理步骤，同时用实际数据加以说明。

1 引言

来自民用与军事组织的各种不同调制类型与参数的发射信号都集中在短波频段。信号的持续时间从低截获概率（LPI）信号的零点几毫秒到数天。信号监视系统的任务是探测并区分来自一个特定区域的所有辐射源。宽带多信道测向系统（如 VKP4000）的性能在检测能力方面，尤其是对短的突发信号比传统的单信道扫描系统好，但它会产生高速原始数据流。数字信号处理的重要挑战之一就是设计一种数据压缩算法以适应基于宽带原始数据的辐射源检测，利用时间和频率上的相关性，同时认为较慢的时间特性能改变频率选择的短波信道。

2 输入数据

宽带多信道测向系统 VKP 4000 的模拟前端从一个等基线长 b 的 L 形天线阵获得数据。三个接收信道均为 1.2MHz。这些信号被数字化并经过快速傅里叶变换（FFT）的多相滤波处理，转换成多信道数据块。每个数据块包含 N_{FFT} 个样本。信道带宽在 0.125-2kHz 之间进行选择，使暂时数据块间隔为 0.5-8ms。每个 FFT 通道的 5 个连续块的相应复数样本 $x_{ij}[k]$ 求平均得到一个可靠的统计值 $\bar{x}_{ij}[l]$ 用于干涉仪测向算法。

$$\bar{x}_{ij}[l] = \sum_{k=0}^4 x_{ij}[5l+k] \quad 0 \leq l \leq N_{FFT}-1 \quad (1)$$

下标 j 代表接收机信道，可以是“北”、“中”或“东”。干涉仪测向算法根据下式估计每个平均数据块组（我们称之为“时频单元”或 TFC）的每个 FFT 信道入射波的方位角 $\alpha_i[l]$ 和 $\varepsilon_i[l]$ ，

$$\Delta\phi_{nc,i}[l] = \arg\left(\frac{\bar{x}_{i,北}[l]}{\bar{x}_{i,中}[l]}\right) \quad (2)$$

$$\Delta\phi_{ec,i}[l] = \arg\left(\frac{\bar{x}_{i,东}[l]}{\bar{x}_{i,中}[l]}\right) \quad (3)$$

$$\alpha_i[l] = \arctan \left(\frac{\Delta \phi_{ec,i}[l]}{\Delta \phi_{nc,i}[l]} \right) \quad (4)$$

$$\varepsilon_i[l] = \frac{\lambda}{2\pi b} \sqrt{\Delta \phi_{nc,i}^2[l] + \Delta \phi_{ec,i}^2[l]} \quad (5)$$

λ 为波长。除了 $\alpha_i[l]$ 和 $\varepsilon_i[l]$ 之外，每个时频单元 (TFC) 还可以由能量估计 $E_i[l]$ 和表示信号质量的相关量度 $p_i[l]$ 来描述，给出如下：

$$E_i[l] = \frac{1}{5} \sum_{k=0}^4 |x_{i,j}[5l+k]|^2 \quad (6)$$

$$p_i[l] = \frac{\left| \sum_{k=0}^4 x_{i,j}[5l+k] \right|}{\sum_{k=0}^4 |x_{i,j}[5l+k]|} \quad (7)$$

并组成数组

$$TFC_i[l] = [\alpha_i[l] \varepsilon_i[l] E_i[l] p_i[l]] \quad (8)$$

VKP 4000 产生的一个多信道数据示例如图 1^①所示，它是从测向系统指令窗口的屏幕显示得到的。上框表示能量估计 $E_i[l]$ 的暂时值与频率的关系^②；中间框表示局部频率范围展开的能量估计 $E_i[l]$ 的暂时值与频率的关系，每个 TFC 对应图片中的一个像素，同时收集的所有 TFC 表示在同一水平线上；同时，方位估计直方图示于下框，直方图的值是用像素点颜色进行编码，下框中的垂直轴表示方位角而不象上框中的时间。来自不同方向、具有不同带宽的信号在下框中的相应方位/频率位置表现成像素群。针对通信信号监视任务，将描述原始数据的像素转换成描述辐射源是很有必要的，反映的信息包括：(1) 出现一个新信号，(2) 信号特征参数发生了重要改变，(3) 信号消失。该算法应当考虑到通常用于短波频段的不同发射类型，如摩尔斯电码 (Morse)、幅度调制语音、连续和猝发 (如数据、跳频信号) 以及应当受到抑制的可能的干扰。该系统应完全独立于任何未知的信道分配网格和短波信道电离层频率选择衰减引起的信号失真。下节介绍适于实时处理的完成上述功能的计算过程。

3 单一猝发信号的 ESMA 检测

在第一个处理阶段，同一猝发信号的所有 TFC 都在该频率方向进行扫描，计算出指示器矢量

$$d_i[l] = \begin{cases} m_2 & \text{if } f2(TFC_i[l]) \\ m_1 & \text{if } f1(TFC_i[l]) \\ m_0 & \text{if 其它。} \end{cases} \quad (9)$$

^① 图 1~2、4~7 略，感兴趣者请参见原文。

^② 原文有误。

其中 m_2 、 m_1 和 m_0 表示三个独立事件：“可靠的探测”（ m_2 ）、“探测”（ m_1 ）和“无探测”（ m_0 ），判决计算 $f_j(TFC_i[l])$ ， $j = 1, 2$ 。这可简化为门限操作，定义为

$$f_2(TFC_i[l]) = (E_i[l] > \sigma_{i2}[l]) \wedge (p_i[l] > \varphi_{i2}[l]) \quad (10)$$

$$f_1(TFC_i[l]) = (\sigma_{i1}[l] < E_i[l] < \sigma_{i2}[l]) \wedge (\varphi_{i1}[l] < p_i[l] < \varphi_{i2}[l]) \quad (11)$$

适当选择门限值 $\sigma_{ij}[l]$ 、 $\varphi_{ij}[l]$ 之后，含有探测信号的 TFC 都收集到 ESMA 中。

ESMA 是相邻 TFC 的集合，它满足如下几个条件：

$$\text{ESMA} = \{ TFC_i[l], l \in [l_s, l_e] \mid h(\alpha_i[l], \varepsilon_i[l]) \wedge \exists l : d_i[l] = m_2 \wedge \|\{TFC_i[l] \mid d_i[l] = m_0\}\| < L \} \quad (12)$$

同种谓词 $h(\alpha_i[l], \varepsilon_i[l])$ 利用相邻 TFC 之间的相关性，能够象 ESMA 中 TFC 的方位角和仰角的门限操作一样简单：

$$h(\alpha_i[l], \varepsilon_i[l]) = |\alpha_i[l] - \bar{\alpha}_i| < \sigma_\alpha \wedge |\varepsilon_i[l] - \bar{\varepsilon}_i| < \sigma_\varepsilon \quad (13)$$

$\bar{\alpha}_i$ 和 $\bar{\varepsilon}_i$ 表示 ESMA 的方位角和仰角的平均值。至少有一个收集到 ESMA 中的 TFC 已被可靠地检测。通过允许（达到一定的数量）带有检测标记 m_0 的 TFC（例如无信号检测的 TFC），就能弥补能量峰值之间的缺口，克服信号调制（如 FSK）或由短波信道频率选择性衰减引起的频谱零点。检测算法（如 TFC、ESMA 和 ES）中各个基本操作之间的关系示于图 3。

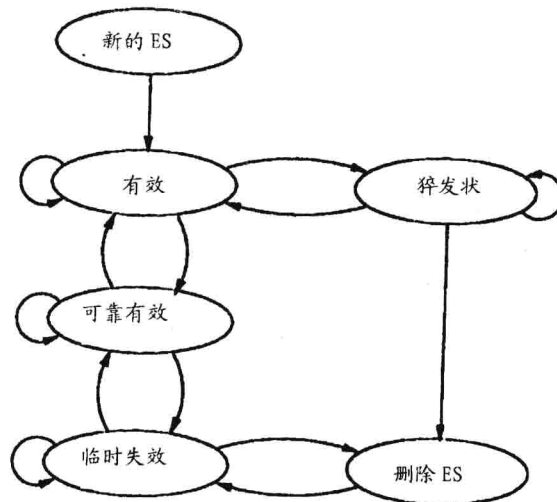


图 3 描述 ES 整个过程的状态图

4 辐射源跟踪

第一步中产生的 ESMA 是单个猝发信号的全过程。在确定删除前，一个猝发之内找到的所有 ESMA 要与直到上一猝发的一系列表示过去频带的 ES 相