

无线电导航系统 信号接收技术

WUXIANDIAN DAOHANG XITONG XINHAO JIESHOU JISHU

沈 锋 著

本书看点:

- ✦ 详述扩频导航微弱信号同步理论;
- ✦ 尝试解决观测量提取关键技术;
- ✦ 重点研究了信号捕获和信号跟踪;
- ✦ 探讨了天波干扰消除和非高斯干扰抑制等技术。



国防工业出版社

National Defense Industry Press

无线电导航系统 信号接收技术

沈 锋 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

海洋无线电导航系统属于陆基无线电导航,系统工作中短波频段,采用扩频体制,利用直达波的传播延迟进行测距定位。本书围绕扩频导航微弱信号同步理论与观测量提取等关键技术问题进行了全面深入的研究,重点研究了信号捕获、信号跟踪、观测量提取、天波干扰消除和非高斯干扰抑制等技术。

本书可作为导航、制导与控制专业教学用书;也可供从事无线电导航、信号检测与估计等领域的专业人员和有关专业院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

无线电导航系统信号接收技术/沈锋著. —北京:国防工业出版社,2010.1

ISBN 978-7-118-06528-2

I. 无... II. 沈... III. 无线电导航—信号接收 IV. TN96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 149627 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 10 $\frac{1}{4}$ 字数 260 千字

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

目前,世界各国在大力发展卫星导航定位系统的同时,都在继续发展陆基无线电导航定位系统。与卫星导航定位系统相比,陆基无线电导航定位系统具有成本低、维修方便等特点,同时,各种先进的技术也逐渐被应用于陆基无线电导航定位系统,以提高陆基无线电导航定位系统的性能。

本书研究的海洋无线电导航系统即为一种新型的陆基无线电导航定位系统,其采用了先进的扩频体制,主要应用于海洋开发、船舶航行等领域,为载体提供高精度定位信息。系统工作在中短波频段,存在着大气噪声、天波干扰、远近效应等。本书集中讨论了系统信号传播特性与接收机信号同步方法,包括地波信号的捕获、跟踪,天地波的分离,非高斯干扰的抑制,观测量的提取等,并给予了实现及试验验证。

作者用了七年的时间参与完成了海洋无线电导航系统的设计,主要负责接收机基带信号处理,特此将这些年研究成果著成本书与读者共享。这里要特别感谢哈尔滨工程大学的孙枫教授、郝燕玲教授和徐定杰教授对本书的具体指导,感谢赵丕杰博士、郭少彬博士、刘洋博士对本书部分章节的著作提供的帮助,还要感谢课题组其他成员对本书所提供的帮助和支持。

由于作者的水平有限,本书难免存在一些缺点和不足之处,请读者批评指正。

作 者
2009 年 8 月

目 录

第1章 海洋无线电导航系统概述	1
1.1 引言	1
1.2 系统工作原理	2
1.3 系统组网方式	3
1.3.1 扩频技术的理论基础	3
1.3.2 扩频的处理增益和抗干扰容限	5
1.3.3 扩频系统中的伪随机码	6
1.3.4 DS-BPSK 调制技术	6
1.4 系统组成	8
1.4.1 岸基导航台	8
1.4.2 导航接收机	8
1.5 本书内容安排	9
参考文献	10
第2章 信道特性	11
2.1 地波传播特性	11
2.1.1 单一路径条件下地波场强计算	11
2.1.2 混合路径条件下地波场强计算	18
2.1.3 地波信号时延计算与分析	23
2.2 天波传播特性	25
2.2.1 电离层的组成	25
2.2.2 天波场强计算与分析	26
2.2.3 天波时延计算与分析	27
2.3 大气噪声特性	28
2.3.1 大气噪声电平	28
2.3.2 大气噪声模型	28
2.4 干扰情况分析	29
参考文献	30
第3章 地波信号捕获技术	31
3.1 基于平方和检测器的伪码捕获方法	31
3.1.1 捕获结构数学模型	31

3.1.2	捕获性能分析	33
3.2	局部最佳检测器原理	37
3.3	基于 LOD 的伪码捕获方法	39
3.3.1	观测信号模型	39
3.3.2	基于 LOD 的伪码捕获结构	41
3.3.3	性能仿真分析	42
3.3	未知噪声模型下伪码捕获技术	44
3.3.1	未知噪声的最大熵 PDF 估计算法	44
3.3.2	基于分数最大熵 PDF 估计的 LOD 捕获结构	49
3.3.3	性能仿真分析	52
3.4	信号捕获策略	53
3.4.1	大步进串行捕获	54
3.4.2	捕获判定策略	55
3.4.3	一种自适应门限设计方法	56
	参考文献	57
第 4 章	信号跟踪技术	59
4.1	伪码跟踪方法	59
4.1.1	全数字非相干 DDLL	59
4.1.2	复杂信道下的伪码跟踪性能	63
4.1.3	一种多相关值定宽拟合抗干扰伪码跟踪方法	68
4.2	载波跟踪技术	71
4.2.1	载波频率跟踪	71
4.2.2	载波相位跟踪	72
4.2.3	动态环境下载波跟踪技术	73
4.2.4	信息解调技术	74
4.3	环路测量误差	75
4.3.1	DDLL 环测量误差	75
4.3.2	FLL 环测量误差	76
4.3.3	PLL 环测量误差	78
4.4	最佳带宽设计	80
	参考文献	81
第 5 章	天波干扰抑制技术	83
5.1	天波信号的快速捕获技术	83
5.1.1	迭代信息传递算法	83
5.1.2	基于 IMPA 算法的天波捕获	88
5.1.3	性能仿真与分析	92
5.2	干扰消除技术	95
5.2.1	多用户检测技术	95

5.2.2	串行干扰抵消技术	96
5.2.3	串行干扰抵消数学模型	97
5.2.4	串行干扰抵消方案	98
5.2.5	串行干扰抵消性能分析	99
参考文献		101
第6章	非高斯干扰抑制技术	103
6.1	引言	103
6.2	ADP 干扰抑制技术	104
6.2.1	ADP 干扰抑制结构	104
6.2.2	性能仿真与分析	106
6.3	FADP 干扰抑制技术	111
6.3.1	频域幅值处理的具体结构	111
6.3.2	性能仿真与分析	115
参考文献		120
第7章	接收机的实现	121
7.1	基带信号处理总体结构	122
7.2	FPGA 电路设计	123
7.2.1	本地伪码产生模块	123
7.2.2	本地载波产生模块	126
7.2.3	数据相关处理模块	128
7.2.4	天波干扰抵消模块	130
7.3	DSP 软件设计	133
7.3.1	信号同步软件总体结构	133
7.3.2	地波信号的捕获	134
7.3.3	信号的跟踪	135
7.3.4	天波干扰消除	136
7.4	观测量提取技术	137
7.5	试验数据与分析	140
7.5.1	地波信号的捕获	140
7.5.2	地波信号的跟踪	142
7.5.3	天波干扰的抑制	144
7.5.4	观测量提取	144
7.5.5	接收机长时间航行试验数据分析	145
附录 A		148
附录 B		150
附录 C		151

第1章 海洋无线电导航系统概述

1.1 引言

导航是保障人类交通及军事活动的必要手段。从20世纪开始,尤其是第二次世界大战以来,导航已发展成为一种专门的技术,形成了较为完备的体系。从20世纪80年代开始,导航发生了巨大的转变,其所使用的技术、所产生的效能,以及在民用和军用中的作用都有了质的飞跃,导航的用户群体也极大地扩展了。

无线电导航系统中导航台与运载体上的导航设备用无线电波相联系,形成一个导航系统。导航系统根据导航台设置的位置不同,分为陆基导航系统和卫星导航系统。陆基无线电导航通常是指发射导航信号的导航台设置在地球表面,而卫星导航系统则是指发射导航信号的导航装置设置在卫星上。

陆基系统所能提供的导航信号覆盖范围和所产生的定位精度两者不可兼得,即覆盖范围很大的系统,其导航精度和导航数据的更新速率较低,而提供高导航精度的系统只有有限的覆盖范围。这是因为设计这些导航系统时只有两种可能的选择,要么选择很低的信号发射频率,比如奥米伽系统^[1],频率为10kHz左右,电波在地球表面与电离层之间形成的“大气波导”中来回反射,因此可以传到很远的地方,可使全球任何地方都有无线电导航信号覆盖。然而由于工作在低频,电波传播受到电离层变动、地表导电性能变动的影响,因此导航精度比较低。另一种选择是用较高的频率,这是可以设计出具有较高精度的导航系统,如塔康(TACAN)、仪表着陆系统等^[2,3],以满足要求高精度导航服务的航行阶段的需求。然而在高频率上的电波沿直线传播而且要穿透电离层,由于地球表面的弯曲和地形起伏,因此一个导航台只能覆盖较小的区域,要完成大范围覆盖则要毗邻布局大量导航台。由于第二次世界大战军事的迫切需要,加速了陆基无线电导航的发展。在战争期间及战后不长的岁月里,出现了许多新的陆基无线电导航系统及设备^[4-6]。其中包括为航空服务的伏尔(VOR),测距仪(DME),塔康,航空无线电信标(Aeronautical Radiobeacon),仪表着陆系统(ILS),微波着陆系统(MLS);为航空和航海服务的罗兰—C(Loran—C),奥米伽(Omega);以及为航海服务的航海无线电信标(Maritime Radiobeacon)。这些在第二次世界大战以来陆续出现的系统相互搭配,构成较为完备的导航混合体,以满足运载体在不同航行阶段的要求。

卫星导航系统是近20年发展起来的无线电导航系统,它是以人造卫星作为导航台的星基无线电导航系统,能为全球海、陆、空的用戶,全天候、24h连续提供高精度的三维位置、速度和精密时间信息。

从覆盖范围和定位精度来看,卫星导航系统的性能大大超过陆基无线电导航系统,是导航系统的发展方向。但卫星导航系统也存在固有的缺点:由于反卫星卫星、激光和粒子束武器的发展使卫星导航受到威胁;卫星导航系统地面监控系统庞大,一旦其中某个设施被摧毁,将危及整个系统;卫星导航信号非常微弱,商用甚高频无线电、超视距军用雷达和广播电视等都构

成了潜在的具有威胁的干扰。

针对卫星导航的风险,美国决定更新并继续发展陆基无线电导航系统,如罗兰—C 系统,并在下一发展阶段将罗兰—C 作为 GPS 的陆基增强系统。可以说,将来的导航系统应该是以卫星导航系统为主,陆基导航系统为补充的复合导航技术发展方向。

为建立完备的导航体系,我国在开发应用卫星导航系统(包括“双星”在内)的同时,继续发展不同种类的陆基无线电导航系统,对卫星导航系统进行补充和增强,特别是在卫星导航系统不可用时,陆基导航系统可以作为后备补充独立工作。卫星导航系统的资源也可以被陆基导航系统充分开发和利用以提高陆基系统性能,例如,利用卫星导航系统的授时功能,利用卫星导航系统数据修正地波传播误差。

海洋无线电导航系统属于陆基无线电导航系统,主要应用于海洋开发、船舶航行等领域,为载体提供高精度定位信息。海洋无线电导航系统采用扩频体制,利用直达波的传播延迟进行测距定位,系统工作在中短波频段,大气噪声强,存在天波干扰、远近效应、多径效应,信道模型复杂,因此实现难度大。在此频段上开展导航应用的扩频系统研究是一个崭新的课题,在此复杂环境下实现微弱扩频导航信号的同步和观测量的提取更是整个系统正常工作的关键。扩频导航接收机信号同步分为粗同步和精同步,即信号的捕获和跟踪,本书围绕扩频信号同步理论与观测量提取等关键技术问题进行了全面深入的研究,设计了信号捕获、信号跟踪、观测量提取、天波干扰消除和多径抑制的实现方案。

1.2 系统工作原理

通常,无线电定位是位于未知点的接收机通过测量与已知位置导航台的距离或距离差来实施的。两种定位方式分别称为圆圆定位和双曲线定位^[7,8]。导航系统的定位方式不同,系统的定位误差,GDOP 分布也不一样,其主要原因是两种定位方式采用不同的定位位置线,参考文献[9,10]从测量角度推导了圆圆定位和双曲线定位误差的等概率误差椭圆数学表达式,指出接收机以一定概率落在以真实位置为中心的误差椭圆内,并给出了一种利用等概率误差椭圆确定导航系统工作区的方法。参考文献[10]从圆圆定位、双曲线定位的位置线准确度,定位误差分布和定位盲区方面作了对比研究,获得了一些有实用价值的结论。

根据海洋无线电导航系统的工作范围、我国海岸线的特点和参考文献[9-11]的分析结论,并考虑到将来海上无线电定位的发展趋势^[12],海洋无线电导航系统采用圆圆定位体制。在无线电导航系统中接收载体实现三维定位需接收四个导航台的导航信号实现位置解算,这是因为接收机与发射台之间存在着钟差问题。在海洋无线电导航系统中用户接收机安装在水面载体上,无需高程位置的解算,因此接收载体只需接收三个导航信号便可实现二维坐标上的位置解算,图 1-1 给出了系统定位原理。接收机通过测量载体位置与各导航台的伪距作为观测量提供给定位解算程序,从而实现位置的解算。

在平面坐标系中,接收机的测量方程为

$$\begin{cases} \bar{R}_1 = R_1 + C\Delta t_u + K\Delta f = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} + C\Delta t_u + K\Delta f \\ \bar{R}_2 = R_2 + C\Delta t_u + K\Delta f = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} + C\Delta t_u + K\Delta f \\ \bar{R}_3 = R_3 + C\Delta t_u + K\Delta f = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} + C\Delta t_u + K\Delta f \end{cases} \quad (1-1)$$

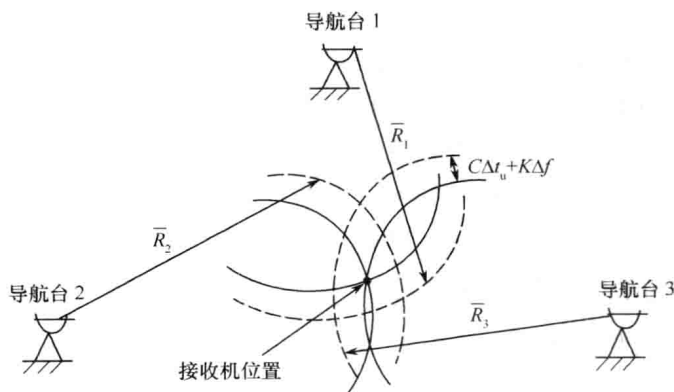


图 1-1 系统定位原理

式中 $\bar{R}_i$ ——接收机与第 i 个导航台间的伪距, 含有 $(0, \sigma_R^2)$ 测量误差和导航台之间同步误差 (m);

$K\Delta f$ ——接收机与发射台之间频差引起的伪距变化量 (m);

R_i ——接收机与第 i 个导航台间的真实距离 (m);

C ——大气中无线电波传播速度, $C \approx 2.996911 \times 10^8$ (m/s);

Δt_u ——接收机时钟与导航台链时钟的钟差 (s);

(x_i, y_i) ——导航台位置坐标;

(x, y) ——接收机位置坐标。

理论上要求系统中三个导航台时钟保持精确同步, 而实际中三个导航台分布在不同位置, 它们之间通过各种不同途经实现台站时钟同步时总存在一定的误差, 加上信号在传播过程中信道的衰落引起的信号变形导致接收机观测量提取存在一定的误差, 实际接收机提取的观测量总存在一定的误差, 引起位置解算的误差, 在图 1-1 中, 接收载体通过接收机提取的观测量 (虚线部分) 与真实距离差 (实线部分) 存在偏差, 导致导航解算的位置与接收载体真实位置存在误差。

1.3 系统组网方式

扩频通信技术因其具有抗干扰能力强、保密性好、能抗多径衰落等优点被广泛应用于军民通信与导航领域中。扩频系统在发射端将需传送的信息数据用伪码序列进行调制, 实现频谱扩展后进行传输; 在接收端采用同样的伪码序列进行相关处理, 恢复出原始的信息数据。因此, 扩频通信具有伪码调制和信号相关两大特点^[13]。正是这些特点保证了扩频系统具有抗干扰能力强、抗多径衰落、保密性强、低功率谱密度下工作、可实现码分多址和高精度测量的优点。

1.3.1 扩频技术的理论基础

扩频技术又称扩展频谱 (Spread Spectrum, SS) 技术, 即将待传送的信息数据用伪随机码调制, 实现频谱扩展后再传输, 接收端则采用同样的编码进行解调及相关处理, 恢复原始数据。传统的无线通信、导航系统的射频信号带宽与信息本身的带宽大小相当, 而扩频技术是传输信

息的信号带宽远远大于信息本身带宽的一种方式。

扩频技术的理论基础可以用信息论和抗干扰理论的基本观点加以说明。信息论的奠基人香农指出:“现实有效通信的最佳途径是白噪声形式的信号传递”^[14]。这为扩频技术的发展指明了方向,奠定了理论基础。根据香农信息论,对于连续信道,如果信道带宽为 B ,且受到加性白噪声干扰,则其信道容量的理论公式为

$$C = B \log_2 (1 + S/N) \quad (1-2)$$

式中 N ——白噪声的平均功率(均方值);

S ——信号的平均功率;

S/N ——信噪比;

C ——信道可能传输的最大信息速率(即信道能达到的最大传输能力)。

从上述香农公式可以得出一个重要结论:带宽与信噪比具有互换关系。在给定信号功率和白噪声功率 N 的情况下,只要采用某种编码系统,就能以任意小的差错概率,以接近于 C 的传输速率来传送信息。这个公式还暗示:在保持信息传输速率 C 不变的条件下,可以用不同频带宽度 B 和信噪比来传输信息。换言之,频带 B 和信噪比是可以互换的。也就是说,如果增加信号频带宽度,就可以在较低的信噪比的条件下以任意小的差错概率来传输信息。甚至在信号被噪声淹没的情况下,即 $S/N < 1$, 或 $10 \log_2 S/N < 0 \text{dB}$, 只要相应的增加信号带宽,也能进行可靠的传输。上述表明,采用扩频技术的优越性在于用扩展频谱的方法可以换取信噪比上的好处^[14]。

柯捷尔尼科夫在其潜在抗干扰性理论中得到如下关于信息传输差错概率的公式^[14],即

$$P_e \approx f\left(\frac{E}{n_0}\right) \quad (1-3)$$

式(1-3)表明,差错概率 P_e 是信号能量 E 与噪声功率谱密度 n_0 之比的函数。设信息持续时间为 T ,或数字信息的码元宽度为 T ,则信息带宽 B_m 为

$$B_m = \frac{1}{T} \quad (1-4)$$

信号功率 S 为

$$S = \frac{E}{T} \quad (1-5)$$

已调(或已扩频)信号的带宽为 B ,则噪声功率为

$$N = n_0 B \quad (1-6)$$

将式(1-4)~式(1-6)代入式(1-3)可得

$$P_e \approx f\left(\frac{ST}{N} \cdot B\right) = f\left(\frac{S}{N} \cdot \frac{B}{B_m}\right) \quad (1-7)$$

式(1-7)表明,差错概率 P_e 是输入信号与噪声功率之比 S/N 和信号带宽与信息带宽之比 B/B_m 二者乘积的函数,信噪比与带宽是可以互换的。它同样指出了用增加带宽的方法可以换取信噪比上的好处这一客观规律。

综上所述,将信息带宽扩展 100 倍,甚至 1000 倍以上的宽带信号来传输信息,就是为了提高系统的抗干扰能力,即在强干扰条件下保证可靠安全地工作。这就是扩频技术的基本思想

和理论依据。

最常用的扩频工作体制有直接序列扩频(DS)、跳频(FH)和跳时(TH)等,可应用于测距定位的有DS和FH两种方式^[15]。在对DS和FH两种扩频体制特性综合比较的基础上,海洋无线电导航系统采用DS扩频通信体制。DS扩频信号的功率谱完全淹没在噪声下,具有较强的隐蔽性,接收机采用相关检测技术就可以从噪声中提取出被淹没的DS信号,实现导航定位。

常见的直接序列扩频体制有振幅键控(ASK)、频移键控(FSK)和相移键控(PSK)^[15]。其中以PSK性能最佳。PSK调制有包括BPSK和QPSK(四相相移键控)工作方式。QPSK调制在一个码元时间可以传送二个信息位,BPSK调制在一个码元时间传送一个信息位,因此QPSK的信息传送率较BPSK快了一倍,但QPSK的解调误码率大于BPSK的解调误码率。在传送信息速率相同的条件下,对BPSK和QPSK调制方式的信号进行相干检测时,有相同的误码率。从实现调制和解调的复杂度来看,BPSK调制和解调易于实现,而QPSK调制和解调比较复杂。因此为了简化设备和减小技术难度,系统采用BPSK调制。

一般无线电导航系统中,接收机为了区分来自不同导航台的扩频信号,必须采用多址技术进行组网。常见的多址技术有时分多址(TDMA)、频分多址(FDMA)和码分多址(CDMA)^[15]。TDMA不允许连续载波观测量的获取,这就限制了采用载波相位测量定位,无法获得高精度的距离观测量。FDMA信号占用的总频带较宽,当接收机同时跟踪多个导航台的扩频信号时,接收机必须工作在多个中心频率上,用户设备成本比较高。因此越来越多的无线电导航系统采用的多址技术,如美国的GPS卫星导航系统和欧洲的伽利略卫星导航系统。海洋无线电导航系统同样采用码分多址的组网方式。

1.3.2 扩频的处理增益和抗干扰容限

扩频系统由于在发端扩展了信号频谱,在收端解扩后恢复了所传信息,这一处理过程带来了信噪比上的好处,即接收机输出的信噪比与输入的信噪比相比有了较大的改善,从而提高了系统的抗干扰能力。因此,可以用系统输出信噪比与输入信噪比二者之比来表征扩频系统的抗干扰能力。理论分析表明,各种扩频系统的抗干扰能力大体上都与扩频信号带宽 B 与信息带宽 B_m 之比成正比。工程上常以分贝(dB)表示,即

$$G_F = 10 \lg \frac{B}{B_m} \quad (1-8)$$

式中 G_F ——扩频系统的处理增益,它表示了扩频系统信噪比改善的程度,因此 G_F 是扩频系统一个重要的性能指标。

仅仅知道了扩频系统的处理增益,还不能充分的说明系统在干扰环境下的工作性能。因为系统要正常工作,还需要保证输出端有一定的信噪比(如CDMA蜂窝移动系统为7dB),并需扣除系统内部信噪比的损耗(包括射频滤波器的损耗,相关处理器的混频损耗,放大器的信噪比损耗等),因此需引入抗干扰容限,其定义为

$$M_j = G_F - \left[L_{\text{sys}} + \left(\frac{S}{N} \right)_{\text{out}} \right] \quad (1-9)$$

式中 M_j ——干扰容限;

G_F ——系统的处理增益;

L_{sys} ——系统损耗;

$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{out}}$ ——相关解扩输出端(即基带滤波器输出)要求的信噪比。

若设扩频增益 $G_F = B_c/B_d = 39\text{dB}$, 系统损耗 $L_{\text{sys}} = 3\text{dB}$, 要求输出信噪比 $(S/N)_{\text{out}}$ 为 10dB , 则由式(1-9)可得系统的干扰容限 M_j 为 26dB 。它表明干扰功率超过信号功率 26dB 时, 系统就不能正常工作; 而在二者之差不大于 26dB 时, 系统仍能正常工作, 即信号在一定的噪声(或干扰)淹没下也能正常工作。这说明接收机能在信噪比为 -26dB 的环境下正常工作。

1.3.3 扩频系统中的伪随机码

伪随机噪声码, 简称伪随机码, 它是一种可以预先确定并可重复产生和复制, 又具有随机统计特性的二进制码序列。伪随机码一个很重要的特性就是相关特性, 这对测距导航系统有着非常重要的意义。

伪随机码自相关函数为

$$R(\tau) = \frac{1}{pT_c} \int_0^p S_1(t) S_1(t + \tau) dt \quad (1-10)$$

伪随机码互相关函数为

$$R(\tau) = \frac{1}{pT_c} \int_0^p S_1(t) S_2(t + \tau) dt \quad (1-11)$$

式中 $S_1(t)$ 、 $S_2(t)$ ——作为时间函数的伪随机码序列, 这里假设这两个码序列具有相同的码长和码片宽度;

T_c ——伪随机码的码片宽度;

p ——伪随机码序列的长度;

τ ——时间延迟参数。

由式(1-10)和式(1-11)可看出, 当时延参数 τ 在一个周期区间变化时, 其相关函数也相应地变化, 即相关函数 R 是时延参数 τ 的函数, 由于 $S_1(t)$ 与 $S_2(t)$ 均为相同周期 pT_c 的周期函数, 所以相关函数也是周期为 pT_c 的周期函数。

当时延参数 $\tau = 0$ 时, 伪随机序列的自相关函数值最大。伪随机序列自相关函数特性具有重要意义, 它是伪随机噪声码测距技术的理论基础。当导航台发射一种伪随机码, 而接收机内也产生相同的伪随机码, 若时间已精确同步, 那么, 当导航台信号经过传播距离的时间延迟 τ 后到达接收机, 与本地码进行相关处理, 移动本地码, 使相关函数为最大值, 则本地码所移动的延迟值就是导航台信号的传播延迟 τ (传播时间), 再乘以光速即为所测距离。

1.3.4 DS-BPSK 调制技术

扩频通信的主要特征是使用比发送的信息速率高得多的伪随机编码, 扩展作为基带信号的数据信息频谱, 成为极低功率频谱的宽带信号, 在接收端使用相关处理的方法恢复基带信号。这些特性使扩频通信不易受干扰, 也不容易干扰别人, 信号隐蔽, 保密性好; 由于扩频信号的带宽非常宽, 因此就很难从噪声中检测出这种信号, 具有低窃听概率。

在发端数据信息经过伪码序列和载波二次调制, 经天线发射出去; 在收端用相同的伪码序列进行解扩, 还原数据信息, 以获得发送数据的估值, 其基本结构如图 1-2 所示。

图 1-2 中信息数据 $d(t)$ 是速率为 f_d 的二进制数据流 (± 1), 伪随机序列 $PN(t)$ 是速率为

f_c , 码长 L 的二进制序列, $d(t)$ 和 $PN(t)$ 地码元宽度应该满足

$$T_d = nLT_c \quad (1-12)$$

则 DS 系统伪码调制输出信号可表示为 $d(t)PN(t)$, 伪码调制的过程实际上就是模二加的过程; 调制后的信号再调制在功率为 P 的载波(频率为 ω_1)上形成模拟信号, 通过发射机和天线辐射出去。

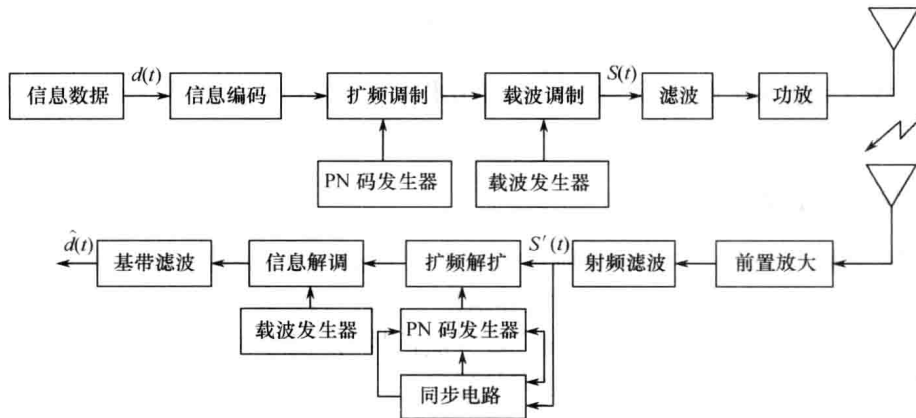


图 1-2 DS-BPSK 系统结构模型

此时发射信号可以表示为

$$S(t) = \sqrt{2P} \cdot d(t) \cdot PN(t) \cdot \cos\omega_1 t \quad (1-13)$$

该信号经由天线发射出去, 无线传输到接收机, 假定信道噪声为加性高斯白噪声 $n(t)$, 其功率谱密度为 N_0 , 还有信道中的各种干扰 $J_i(t)$, 则接收机收到的信号为

$$S'(t) = S(t - \tau) + n(t) + \sum_{i=1}^n J_i(t) \quad (1-14)$$

接收机产生与发射信号中的伪随机码一致的伪随机码信号 $PN(t - \tau')$, 与接收到的信号相关, 假设射频滤波器是带宽为 B_c 的无衰落理想滤波器, 可以让射频信号无失真地通过, 并假设相关处理是完全理性的, 则 $PN(t - \tau)PN(t - \tau') = 1$, 假定信号传输过程中不受人为干扰和噪声干扰的影响, 相关处理后信号 $d(t - \tau)PN(t - \tau)PN(t - \tau') = d(t - \tau)$, 传输的信息被正确恢复。如果存在噪声和干扰, 那么除了上述的解调结果外, 还存在噪声输出和干扰输出项。

实际上扩频系统总是在有噪声和干扰的环境中工作, 因此必须研究 DS 系统在有噪声和干扰的条件下的工作能力, 即扩频系统的抗干扰能力。在相关处理过程中, $s(t)n(t)$ 仍为高斯白噪声, 功率谱密度不变; 窄带干扰 $J(t)$ 被扩展为与 $PN(t)$ 一样带宽 B_c 的信号。以数据带宽对相关后信号滤波, $d(t)$ 可无畸变地恢复, 而噪声和干扰仅有一部分通过滤波器, 相应的功率为 $N_0B_d, P_J(B_d/B_c)$ 。当信道上仅有热噪声而没有干扰时, 接收机输出的信号功率与噪声功率谱密度比, 与未经扩频处理时相同, 扩频与解扩的作用相互抵消, 信号相对于热噪声背景的性能没有得到改善, 因此, 扩频系统对热噪声这样带宽无限宽的干扰是无能为力的; 但是, 对于固定功率的单频干扰信号, 由于相关处理并滤波后的干扰信号功率仅为扩频前的 $B_d/B_c (B_d \ll B_c)$, 系统抗干扰性能大大提高。

扩频通信系统的这种特性由参数扩频增益 $G(\text{Spread Gain})$ 来表示。扩频增益是接收机输

出信噪比 SNR_{out} 与输入信噪比 SNR_{in} 之比,即频谱扩展后信号带宽 B_c 与扩频前信号带宽 B_d 之比,即

$$G = \frac{SNR_{out}}{SNR_{in}} = \frac{B_c}{B_d} \tag{1-15}$$

1.4 系统组成

海洋无线电导航系统由两部分组成,一是用来发射导航信号的岸基导航台;另外是通过接收导航台信号实现载体定位的接收机。

1.4.1 岸基导航台

系统岸基导航台链由三个机动导航台站组成,三个机动导航台硬件配置相同,每个导航台包括发射分系统、天线分系统、电源分系统和指挥分系统,其连接关系如图 1-3 所示。发射分系统完成信号的产生与放大;天线分系统完成导航信号的辐射;电源分系统提供整个导航台的用电;而指挥分系统则是完成各导航台之间的通信。

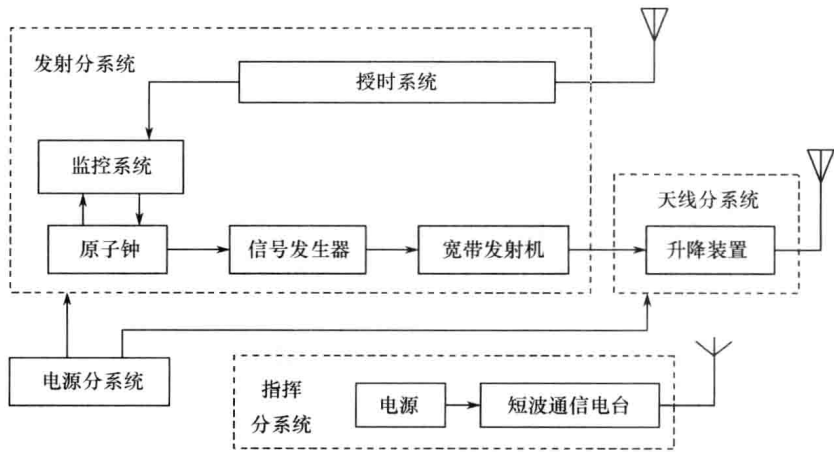


图 1-3 机动导航台硬件配置结构

1.4.2 导航接收机

扩频接收机作为无线电导航系统中的关键技术设备,主要任务是接收、检测扩频导航信号、提取导航原始数据、距离测量、数据解算与处理、完成应用系统所要求的各项功能。为了实现接收机的小型化和提高可靠性,系统的 DS/BPSK 导航接收机采用数字化实现,图 1-4 给出了接收机的结构原理框图,依据系统各部分的工作特点,可将其分为接收天线、前端处理模块、

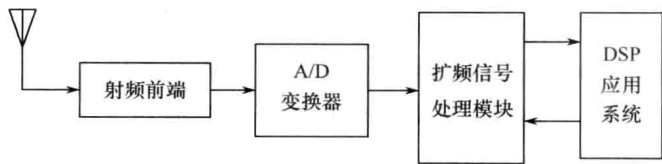


图 1-4 接收机系统结构原理框图

扩频信号处理模块和 DSP 应用系统模块。

接收天线和前端处理模块主要完成对接收信号的滤波、放大、增益控制及信号下变频,并通过 A/D 变换器完成模数转换。

扩频信号处理模块是接收机的核心部分,主要功能是从多个信号中识别出各导航台的扩频信号,并对其进行解扩,在恢复信噪比的基础上解调载波,消除多普勒频偏的影响,恢复基带信号。同时将解扩与解调处理的历元时刻所对应的伪码状态、载波相位状态的观测量和基带信息一起送给 DSP 应用系统模块。

扩频信号处理模块的主要难点是弱信号的捕获与跟踪、三个导航台扩频信号的并行处理与原始观测量的提取。由于扩频信号经过了伪码调制和载波调制,进入接收机的信号信噪比较小,再加上载体动态性引入多普勒频移不确定,信号的快速捕获与载波的精确跟踪比较困难,因而对信号处理器的软硬件配合、信号捕获与跟踪算法及信号解调提出了较高要求。多通道多任务实时处理与带时标的原始观测量提取均有明确的时间特性,必须合理选择时基,并规划各任务的时间片。

DSP 应用系统模块主要对扩频信号处理模块进行实时控制,形成各捕获跟踪环路的闭合,并根据信号处理模块提供的数据进行实时解算,输出导航定位解(载体的位置、速度等信息)。不同的应用环境需要不同的处理算法和精度,比如载波相位接收机、高动态接收机等。因此,DSP 应用处理模块是接收机最重要、最灵活的部分,是体现软件接收机的核心所在。本书所研究的信号接收方法正是基于扩频信号处理模块和 DSP 应用系统模块上实现的。

1.5 本书内容安排

本书以海洋无线电导航系统微弱信号接收作为研究重点,在参考并分析了大量国内外导航接收机和扩频接收机有关文献的基础上,深入地研究与探讨了扩频信号捕获跟踪、强干扰消除等关键技术,设计了地波信号捕获跟踪、天波干扰消除及载波相位观测量提取等方案并实现了其功能。全书研究内容主要包括以下几个方面:

(1)信道特性 详细分析了海洋无线电导航系统的信道特性,包括地波传播特性、天波传播特性和大气噪声特性,并分析了系统中存在的主要干扰。

(2)地波信号捕获技术 首先分析了传统的伪码捕获方法,针对大气噪声的非高斯特性,研究了大气噪声环境下的微弱地波信号捕获方法。

(3)信号跟踪技术 研究了海洋无线电导航系统中的信号跟踪方法,包括伪码跟踪和载波跟踪,并研究了环路测量误差及最佳带宽的设计。

(4)天波干扰抑制技术 针对海洋无线电导航系统夜晚工作时存在的强天波干扰,研究了天波干扰抑制技术,提出了快时变天波信号的实时捕获算法,并提出了基于干扰抵消技术的天波抑制方法。

(5)非高斯干扰的抑制 针对海洋无线电导航系统中可能存在的非高斯窄带干扰,研究了幅值域滤波抗干扰技术,并仿真分析了干扰抑制性能。

(6)接收机实现 给出了海洋无线电导航系统接收的实现,重点描述了微弱信号接收基带信号处理部分的实现。结合接收机信号处理部分的实现,提出了一种伪码载波联合观测量提取方法,给出并分析了部分试验数据。

参 考 文 献

- [1] 漆贯荣. 航海常用无线电信号. 北京:人民交通出版社,1989.
- [2] Offermans G W A, van Willigen D, Breeuwer E J, New Views on the System Aspects of Eurofix, the IEEE 1998 position, location and Navigation Symposium, 1998.
- [3] van Willigen D, Offermans G W A, Helwig A W S. Implementation and testing of Eurofix. The 1998 National Technical Meeting of the Institute of Navigation Long Beach, 1998.
- [4] van Willigen D, Offermans G W A, Helwig A W S. Eurofix System and its Development. The 1998 International Conference of the Royal Institute of Navigation London, 1998.
- [5] van Willigen D, Offermans G W A, Helwig A W S. Definition and current status. The IEEE 1998 position location and Navigation Symposium, 1998.
- [6] Offermans G W A, van Willigen D, Breeuwer E J. Error - Correction Strategies for the Eurofix Navigation System, the 16th Symposium on information Theory in the Benelux. The Netherlands; 1995.
- [7] WEI G S. Principle of Radio Navigation [M]. Press of Southeast University, 1989.
- [8] JIA Y T. Radio Positioning [M]. National Defence Industry Press, 1983.
- [9] DING J B. Identifiable Formula Whether Ship's Position lies in base - Expansion Line [J]. Navigation, 2001, (1): 79 - 83.
- [10] YAN Z. Discussion on Geometric Factor of Hyperbolic Positioning Line [J]. Navigation, 1997, (4): 75 - 78.
- [11] CHENG L, JIAO C D. Marine Navigation Positioning System [M]. National Defence Industry Press, 1991.
- [12] 魏子卿. 广域增强计划及其进展. 导航, 1998, (1).
- [13] 曾庆雯, 刘乃安. 通信中的扩展频谱技术 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995.
- [14] 霍姆斯 J K. [美]. 相关扩展频谱系统 [M] 梁振兴, 蔡开基译. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [15] Ziemer R E, Peterson R L. Digital Communications and Spread Spectrum Systems. New York: MacMillan, 1985.