

文章编号: 1001 - 893X(2011)05 - 0006 - 05

基于太阳辐射源的“夸父”战场定位雷达技术*

胡晋东

(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 450047)

摘要:针对战场无源探测雷达隐身能力的不足,用宽带随机信号相关处理的方法,研究了以太阳光为微波辐射源的“夸父”无源定位雷达技术。计算结果表明,使用 $2\text{ m} \times 7.5\text{ m}$ 口径的车载天线接收系统,对舰船目标探测距离可达 30 km。“夸父”雷达技术在提高战场生存能力方面有重要意义,在港口、机场管制等民用雷达方面也有一定参考价值。

关键词:随机信号雷达;太阳辐射;无源定位;相关函数;测距精度

中图分类号: TN953 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001 - 893x.2011.05.002

Kuafu Battlefield Location Radar Technology Based on Solar Microwave Radiation

HU Jin-dong

(The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

Abstract: The Kuafu passive location radar technology based on solar microwave radiant is studied to overcome the stealth capability defect of battlefield passive detection radar according to the principle of correlative function. The calculation result shows that the warship target detection distance of Kuafu radar is 30km by using a receiver system of vehicle-borne phased array antenna with $2\text{ m} \times 7.5\text{ m}$ aperture. Kuafu radar system is valuable for improving the stealth capability of battlefield radars, and can be applied to civilian radars for port and airport traffic control systems.

Key words: random signal radar; solar radiant; passive location; correlative function; ranging precision

1 引言

现代战争中提高雷达生存能力是非常重要的。以美国“沉默哨兵”为代表的无源探测雷达,以民用广播电台为雷达辐射源对目标进行探测和定位,大大增强了雷达战场生存能力^[1]。但是,根据现代战争特点和激烈程度,一旦战争升级,介入军用的民用设施也必将受到敌方攻击。这就迫使我们寻找一种新的雷达体制,使用大自然中的天然物体作为雷达辐射源,以引导无源雷达工作。我们知道,太阳是一个天然的超宽频带电磁波辐射体,源源不断地辐射

包括低频、高频、微波、毫米波、红外、可见光和紫外等频段在内的全频段电磁信号,这种信号表现为超宽带随机信号。太阳就是一个天然的微波随机信号发射源,我们若依托太阳作天基雷达发射站,自然就可以使用这种随机信号作为雷达探测信号,从而在地面组建无源雷达定位系统(以下简称“夸父”雷达),大幅度提升战场生存能力。因此,能量取之不尽而又不畏导弹等人类武器攻击的太阳,就成为我们的首选目标。本文首次提出了以太阳光为辐射源的雷达侦察定位体制,以展开相关研究,适应现代战争的需要。

* 收稿日期: 2011 - 04 - 26; 修回日期: 2011 - 05 - 19

2 “夸父”雷达原理

2.1 与传统雷达体制的比较

“夸父”雷达就其本质来说,是以太阳辐射的微波电磁能量为发射源的无源随机信号雷达。通过“夸父”雷达与几种主要的传统雷达体制比较,可以看出其优越性。

目前,广泛应用的脉冲雷达无法同时具有最大的作用距离和测距精度,尤其无法同时具有良好的测距和测速精度。

单频连续波雷达不能测距。当用简单的调制波形时,很难做到具有良好的测距精度和测速精度。

脉冲压缩雷达(脉冲内的线性调频)虽然同时具有良好的作用距离和测距精度,可是在抗干扰及区分活动目标能力方面并不理想。

伪随机编码雷达波形的设计使其波形具有随机性,但伪码波形的模糊函数具有周期的图钉形状,存在周期性的缺点。

“夸父”雷达的信号波形是微波随机信号。由于这种信号是彻底的非周期的随机信号,也就消除了对目标测量的距离模糊和速度模糊,因而随机信号雷达在目标发现、测距精度、测速精度及抗干扰等方面均是理想的^[2]。

通过比较可以看出,夸父雷达兼有无源雷达和随机信号雷达两种体制的优点,不仅能同时精确测距和测速,更能在战场中隐遁,并依托太阳为雷达发射站,大大提高生存能力。

2.2 基本工作原理

“夸父”雷达的基本原理是相关法,利用太阳直达波信号与目标回波信号的相关函数的峰值来测量目标距离和速度。相关接收基本原理^[2]框图如图 1 所示。

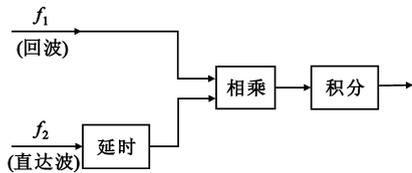


图 1 相关接收基本原理简图

Fig.1 Block diagram of coherent receiver

直达波信号与回波信号进行相关,相关后的结果输出到多普勒滤波器组,由多普勒滤波器输出的峰值可以得到目标的距离和速度。实际上,“夸父”雷达并不能直接测得目标的距离信息,而是通过测

量直达波与回波到达时差 τ ,再辅以对目标测角而间接测得定位信息。根据 τ 即可由计算出一个以太阳、雷达站为焦点的椭球面,被测目标就在这个椭球面上。再根据雷达对目标的测角信息,从而定出目标的位置。测角信息由接收回波的相控天线的角度指向获得;太阳相对于雷达站的精确位置和距离,由作战指挥中心实时获得。“夸父”雷达系统原理简图见图 2。

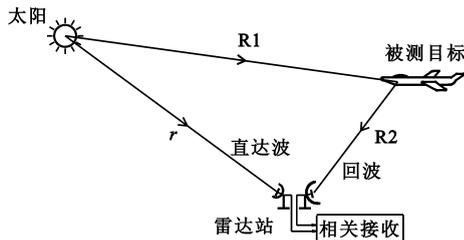


图 2 “夸父”雷达系统原理简图

Fig.2 Schematic diagram of Kuafu radar system

3 相关处理

3.1 相关函数原理^[3]

直达波信号 $f_1(t)$ 为

$$f_1(t) = x(t) + m(t) \tag{1}$$

式中, $x(t)$ 为纯净、不含接收系统噪声的直达波, $m(t)$ 为直达波接收信道的噪声。

反射波信号 $f_2(t)$ 为

$$f_2(t) = y(t) + n(t) \tag{2}$$

式中, $y(t)$ 为纯净、不含接收系统噪声的目标回波, $n(t)$ 为回波接收信道的噪声。

$f_1(t)$ 与 $f_2(t)$ 的相关函数为

$$R(\tau, f_d) = R_{xy}(\tau, f_d) + R_{xm} + R_{ym} + R_{mn} \tag{3}$$

式中,后三项分别为直达波与 $n(t)$ 的相关函数、回波与 $m(t)$ 的相关函数、 $m(t)$ 与 $n(t)$ 的相关函数。由于直达波、回波与信道噪声均不相关,并且两个接收信道的噪声也互不相关,因此式中后三项均为零。第一项为 $x(t)$ 与 $y(t)$ 的相关函数:

$$R_{xy}(\tau, f_d) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t)x(t - \tau)e^{-j2\pi f_d t} dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t - \tau)e^{-j2\pi f_d t} dt \tag{4}$$

式中, τ 为回波相对于直达波的时延, f_d 为回波的多普勒频移。通过对齐时延得到相关峰值(表现为频率为 f_d 的交流信号),以此识别目标并由 τ 测距。

3.2 相关处理增益

处理增益^[4]为

$$G = B \sqrt{t_c t_i} \leq B \sqrt{\frac{\lambda}{2v} t_i} \quad (5)$$

式中, $t_c \leq \frac{\lambda}{2v}$ 为相关处理时间, t_i 为非相关积累时间, B 为信号带宽, λ 为信号中心频率对应的波长, v 为目标最大径向速度。

测距分辨力^[4]为

$$\Delta R = \frac{cT/2}{\cos(\frac{\beta}{2})} \geq \frac{cT}{2} = \frac{c}{2B} = 0.75 \text{ m} \quad (6)$$

式中, $T = \frac{1}{B}$ 为可分辨时间宽度, c 为光速, $\beta \geq 0$ 为目标对太阳与雷达站之间的张角^[4]。

4 主要性能 and 设计方法

4.1 主要性能

在上述原理指导下,我们可以设计一个车载“夸父”系统,用于港口在无线电静默条件下的舰船交通管制。要求最大侦测作用距离30 km,测距分辨力为1 m。系统工作在 $f = 2\,800$ MHz 频率上,工作带宽 $B = 400$ MHz。

按照雷达信号检测理论,雷达信号的单次检测门限 D 由检测概率 P_d 和虚警率 P_{fa} 决定^[5,6]:

$$D = \frac{x}{4} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{16}{x}} \right) \quad (7)$$

其中:

$$x = (g_d + g_{fa})^2 \quad (8)$$

$$g_{fa} = 2.36 \sqrt{-\lg P_{fa}} - 1.02 \quad (9)$$

$$g_d = \frac{1.23t}{\sqrt{1-t^2}}, t = 0.9(2P_d - 1) \quad (10)$$

当取 $P_d = 99.9\%$, $P_{fa} = 0.1\%$ 时,检测门限 $D = 12.3$ dB。下面将计算实际应用系统中的雷达接收信噪比 S/N_0 ,若不满足检测门限,则可通过相关积累和非相关积累获得处理增益 G ,使最终信噪比^[5] $S/N = (S/N_0)G > D$ 。

4.2 设计方法

系统为双天线车载机动雷达站,其中主天线为 $2 \text{ m} \times 7.5 \text{ m}$ 口径的相控天线,用于舰船目标的反射回波;辅助天线为 4 m 口径的普通抛物面天线,天线叶片可折叠,用于接收太阳直达波信号。两部天线装在一辆载车上,利于机动。

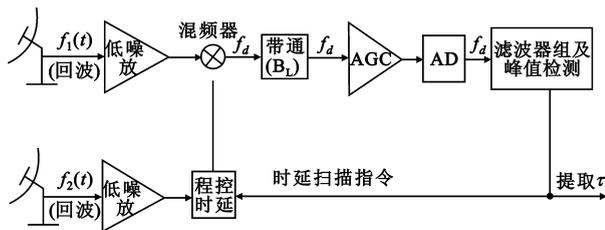


图3 接收电路原理简图

Fig.3 Schematic diagram of receiver circuit

4.2.1 时延测距

通过对直达波与反射波信号进行相关处理,得到时延差和处理增益。直达波 $f_1(t)$ 经延时后与回波 $f_2(t)$ 相乘,经带通滤波器滤去相乘后产生的直流和其它高频杂波信号,得到含多普勒信息的交流信号 f_d 。交流信号 f_d 经 AGC 放大,再经 AD 采样转变为数字信号。数字信号形式的 f_d 经数字滤波器组提纯出。当 $f_1(t)$ 与 $f_2(t)$ 时延对齐时,信号 f_d 的能量达到最大值,在滤波器组输出端可检测到峰值,即相关峰值。当没检测到相关峰值时,通过程控指令,实时遍历延时器的时延量 τ ,直至检测出相关峰值为止。此时读出的 τ 值,即为 $f_1(t)$ 与 $f_2(t)$ 的时延差。其中,程控时延用程控声表面波时延组件实现,乘法运算用混频器实现。

4.2.2 动目标提取

目标径向运动速度为 $v = 1 \sim 20$ m/s,则多普勒频移(单位 Hz)为

$$f_d = \frac{v}{c} f = 9.33 \sim 186.6 \quad (11)$$

式中, $v = 1 \sim 20$ m/s 为舰船目标径向运动速度; $c = 3 \times 10^8$ m/s 为光速; $f = 2\,800$ MHz 为接收信号中心频率。图3所示带通滤波器的通带以 f_d 的范围设定,即 $B_L = 9.33 \sim 186.6$ Hz。这样,直达波和回波相乘后产生的直流分量、高频杂波分量就抑制在带外,我们需要的动目标信号 f_d 由带内提出。

4.2.3 测距分辨力

由式(6),测距分辨力(单位 m)为

$$\Delta R = \frac{c}{2B} = 0.75 \quad (12)$$

计算表明,测距分辨力满足 1 m 的要求。

5 实际回波和直达波计算

5.1 回波信号功率

目标回波电平为

$$S = flux \times \sigma \times B \times \frac{A_r}{4\pi R^2} \quad (13)$$

式中,接收天线有效面积 $A_r = \eta A$, A 为天线孔径面积, η 为天线效率; σ 为舰船有效反射面积; $flux$ 为太阳电磁辐射的流量密度; R 为雷达最大距离。

5.2 接收系统噪声

系统噪声温度(单位 dBK)为

$$T = \frac{T_a}{L_f} + (1 - \frac{1}{L_f}) T_0 + T_e = 22.7 \quad (14)$$

式中,天线等效噪声 $T_a = 100$ K,接收机噪声 $T_e = 45$ K,天线与低噪声放大器之间的馈线损耗 $L_f = 1$ dB,环境温度 $T_0 = 290$ K。

系统噪声谱密度(单位 dBW/Hz)为

$$\phi_0 = KT = -205.9 \quad (15)$$

式中,波尔兹曼常数 $K = 1.38 \times 10^{-23}$ K/J。

系统噪声功率为

$$N_0 = \phi_0 B \quad (16)$$

5.3 回波信噪比

经过相关处理之后的信噪比(单位 dB)为

$$S/N = (S/N_0) G =$$

$$\sigma \times flux \times B \times \frac{\eta A}{4\pi R^2} \times \frac{1}{\phi_0} \times \sqrt{\frac{\lambda}{2v} t_i} = 12.7 \quad (17)$$

式中,天线孔径面积 $A = 2 \times 7.5 = 15$ m²,天线效率 $\eta = 0.55$,舰船最大速度 $v = 20$ m/s,舰船有效反射面积 $\sigma = 12.5$ m²,在2 800 MHz频率的太阳电磁辐射的流量密度 $flux = 60 \times 10^{-22}$ W/m²/Hz,雷达最大作用距离 $R = 30$ km,非相关积累时间 $t_i = 10$ s,信号带宽 $B = 400$ MHz。

计算结果表明,回波接收信噪比满足最大作用距离30 km的要求。

5.4 太阳直达波信噪比

辅助天线接收到的太阳直达波电平为

$$S_i = flux \times \sigma_i \times B \quad (18)$$

式中, $\sigma_i = \eta_i \pi (\frac{D_i}{2})^2$ 为辅助天线有效接收面积, $D_i = 4$ m 为辅助天线口径, $\eta_i = 0.65$ 为辅助天线效率。

辅助接收系统噪声谱密度(单位 dBW/Hz)为

$$\phi_{0i} = KT_i = -207.14 \quad (19)$$

式中, $T_i = 140$ K为接收系统总噪声。

直达波信噪比(单位 dB)为

$$S_i/N_i = flux \times \sigma_i / \phi_{0i} = 14 \quad (20)$$

计算结果表明,直达波接收信噪比满足对太阳

信号进行接收跟踪的的要求。

6 定位精度分析

“夸父”雷达的定位精度由系统误差和随机误差决定,其中,定位系统误差主要由太阳的动态位置测量决定。以太阳为发射站,太阳自身的位置坐标自然就作为系统误差引入。对太阳的精确位置坐标的动态测定,在“夸父”雷达体系中,由统一的作战指挥中心完成并实时下发各个雷达站。对太阳精确定位需要结合天文解算、多站时差测距定轨等方法,技术成熟且自成体系,这里不再讨论。

定位随机误差 σ_l 主要由径向测距随机误差(径向测距分辨力) σ_d 和水平切向测距随机误差 σ_- 组成。由于舰船目标在海平面上,所以不考虑垂直方向的测距随机误差。而 σ_- 又由最大侦测距离 R 和测角随机误差(测角分辨力) σ_α 决定:

$$\sigma_l = \sqrt{(\sigma_d)^2 + (\sigma_-)^2} \quad (22)$$

$$\sigma_- = R\sigma_\alpha \quad (23)$$

测距分辨力 σ_d 由信号处理带宽 B 决定,见式(6)。

相控测角分辨力 σ_α 由天线口径决定:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} \eta A \quad (24)$$

$$\sigma_\alpha = \frac{100}{\sqrt{\frac{G}{\pi}}} = \frac{50}{\sqrt{\frac{\eta A}{\lambda^2}}} = 1.96^\circ \quad (25)$$

所以,定位随机误差 $\sigma_l = 1.0257$ km。

7 结论

“夸父”雷达以太阳微波辐射源为发射站,对战场目标进行无源侦察定位,可大大提高雷达的生存能力;以宽带随机信号作相关处理,大大提高了雷达的测距分辨力和抗干扰能力;但在夜间作战方面还需进一步探讨。

“夸父”雷达以太阳辐射的微波随机信号为雷达发射源,在白天可以正常工作,不受云、雨、雾、雪等气象条件限制,但在夜晚或太阳在地平线以下时,就接收不到太阳直达波信号或目标反射信号了。因此,若用于全天候实战,则有一定限制。为突破这个限制,需要进一步研究,如以增加红外探测系统来克服“夸父”雷达不能夜间工作的弱点。另一方面,“夸父”雷达也适用于科学研究和一定范围的民用领域。

参考文献:

- [1] 王腾朝. 沉默哨兵系统及其核心技术[J]. 军事通信技术, 2009(4):91-95.
WANG Teng-chao. Silent Sentry TM System and Its Core Technology[J]. Journal of Military Communications Technology, 2009(4):91-95. (in Chinese)
- [2] 刘国岁. 随机信号雷达[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
LIU Guo-sui. Random Signal Radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [3] 郭环球. 基于相关函数理论的滤波器设计与仿真[J]. 上海电机学院学报, 2005, 8(3):14-17.
GUO Huan-qiu. Design and Simulation of Filter Based on Correlative Function[J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2005, 8(3):14-17. (in Chinese)
- [4] 徐世友. 基于直播卫星发射信号的空间目标被动探测技术[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2003:26-27.
XU Shi-you. Space Objects Passive-Detecting Technology Using Direct-Broadcasting Satellite Illuminators[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003:26-27.

(in Chinese)

- [5] M I 斯科尔尼克. 雷达手册[M]. 北京:国防工业出版社, 1978.
Merrill I Skolnik. Radar Handbook[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1978. (in Chinese)
- [6] 孙健. 大气波导对预警直升机执勤高度选择决策的影响分析[J]. 中国雷达, 2009(4):3-6.
SUN Jian. Analysis on Effect Between Atmosphere Waveguide and Alarm Helicopter Height[J]. China Radar, 2009(4):3-6. (in Chinese)

作者简介:

胡晋东(1969—),男,河南信阳人,1991获工学学士学位,现为高级工程师,主要研究方向为航天测控及卫星地面应用和战场雷达侦察,曾获“神舟”载人航天工程个人三等功,以及国防科学技术奖二等奖和部级科学技术奖一等奖。

HU Jin-dong was born in Xinyang, Henan Province, in 1969. He received the B.S. degree in 1991. He is now a senior engineer. His research interests include spacecraft TT&C, satellite communication, and battlefield detection system.

Email: mathdreamer@yahoo.com.cn

关于本刊编辑部授权中国知网优先数字出版的通知

根据期刊出版业态创新的需要,为了寻找新的发展空间和经营模式,争取成果首发权,提高期刊的国际竞争力,本刊编辑部已授权中国知网(www.cnki.net)对本刊所录用稿件优先数字出版。作者投稿时需按本刊网站“相关下载”栏目中“《电讯技术》数字优先出版论文模板.doc”格式进行排版。

谢谢支持与合作!让我们为《电讯技术》的发展而共同努力、携手共进!

《电讯技术》编辑部