

文章编号: 1001 - 893X(2012)08 - 1247 - 04

船摇对组阵天线信号合成效率的影响*

毛南平, 李其福, 房新兵, 李培

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要: 为了将天线组阵技术应用于测量船动平台, 必须分析船摇的影响。建立了测量船多测控天线指向同一目标时距离差值随船摇变化的数学模型, 在此基础上得到距离差值变化率与天线方位角、俯仰角的关系曲线, 对测量船各频段天线组阵信号合成效率与积分时间进行了分析, 表明距离差值变化率直接影响信号合成时间, 进而影响合成效率, 频率越高合成效率越低。

关键词: 深空探测; 航天测量船; 天线组阵; 信号合成效率; 船摇

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.08.005

Effect of Ship Swaying on Signal's Synthesis Efficiency of Antenna Array

MAO Nan-ping, LI Qi-fu, FANG Xin-bing, LI Pei

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: It is important to analyse the effect of ship swaying in applying the technique of antenna array to space TT&C ship. The relation model between range difference and ship swaying is presented when radar's antennas point to the same target. And the relation curves between speed of range difference and angles of antenna's azimuth and pitch are plotted. The synthesis efficiency and integral time of various frequencies' signals are analysed, which shows that signal's synthesis time is affected directly by speed of range difference, thus signal's synthesis efficiency is affected. It is also shown that the higher the frequency is, the lower the synthesis efficiency is.

Key words: deep space exploration; space TT&C ship; antenna arraying; signal synthesis efficiency; ship swaying

1 引言

深空探测是我国航天测控发展的必然趋势, 天线组阵又是深空探测领域的一项关键技术^[1]。陆基固定站天线组阵下行接收技术国内外均进行了大量研究, 相关理论比较成熟^[2], 但对于测量船动平台的天线组阵可行性及关键技术未进行研究。从我国测控网安全性和完备性角度出发, 研究和应用车载测控设备天线组阵术, 提高测量船深空测控能力, 利用测量船布站灵活的优势, 满足深空探测任务发射段、早期轨道段的测控支持和特殊情况下不间断覆盖测

控的需要具有重要意义。

从天线组阵的原理可知, 天线组阵的关键技术是对各天线信号进行合成, 信号合成的前提就是通过相关运算解算出各信号的时延或相位差值并修正取齐, 而时延或信号相位差值可以从组阵天线对目标的距离差值推算出^[3], 因此研究测量船动平台天线组阵技术必须研究船摇对天线组阵的影响, 即必须先建立船摇对天线指向目标的距离差值的数学模型。另外, 信号合成是通过相关运算来完成的, 相关运算时间(积分)越长, 时延精度越高, 但要保证相关运算有效, 运算时间要求小于载波 1/8 个周期, 而相关运算时间与组阵天线指向目标的距离差变化率相

* 收稿日期: 2012 - 04 - 25; 修回日期: 2012 - 05 - 15

关,本文在对距离差值的变化率建模后通过仿真计算分析船摇对船载各频段天线信号合成的影响。

2 船载天线相对目标距离差值变化率数学建模

2.1 测量船坐标系、姿态角定义

距离建模前必须对测量船常用坐标系、测量船姿态角进行定义。

2.1.1 测量船坐标系规定

在进行数学建模前,先规定各坐标系的符号及方向^[4]。

(1)大地坐标系(X, Y, Z)

OX :正北方向; OY :垂直水平面向上; OZ :按右手定则确定。

(2)甲板坐标系(X_c, Y_c, Z_c)

OX_c :沿船首尾线向舰首方向; OY_c :垂直甲板平面向上; OZ_c :按右手定则确定。

(3)大地极坐标系,符合右手定则, A, E, r

A :方位角,天线在水平面的投影与正北的夹角,顺时针为正; E :俯仰角,天线在水平面的投影与天线的夹角,向上为正; r :距离,天线至目标的空间距离。

(4)甲板极坐标系, A_c, E_c, r

A_c :甲板方位角,天线在甲板平面投影与 OX_c 轴夹角,顺时针为正; E_c :甲板俯仰角,天线在甲板平面投影与天线的夹角,向上为正; r :距离,天线与目标间的距离。

2.1.2 测量船姿态角规定

测量船船姿船位系统提供的测量船姿态角主要有航向角、纵摇角和横摇角,其符号及方向分别规定如下:

H :航向角,船首尾线在水平面的投影与正北的夹角,顺时针方向为正;

P :纵摇角,船首尾线相对水平面的转角,船首抬高为正;

R :横摇角,绕首尾线相对水平面的转角,右弦下降为正。

2.2 距离建模

以同一艘测量船的两个相邻测控天线为例进行距离差值分析。船上两个天线接收信号时,两组阵天线指向目标的距离差值在船坐标系中空间几何关系如图1所示,设图中待求差值距离为 d ,待求角为 β 。

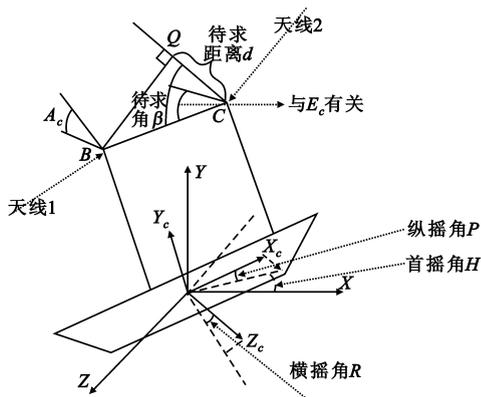


图1 两天线指向同一目标距离几何关系图
Fig.1 Geometrical relation of range when two antennas point to the same target

过天线1与天线1在船面的投影的交点 B 向天线2在船面的投影做垂线,交点为 F 。过 F 点做 CF 的垂线与天线2交于 D 点,连接 BD ,则问题转化为在图2的四面体中求角度。

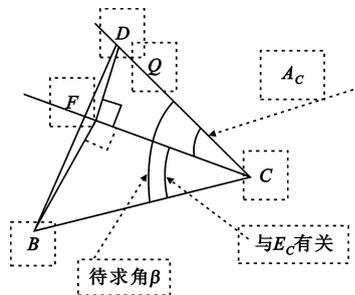


图2 距离差值简化图
Fig.2 Simplified figure of range difference

由相关设备求出天线在地理极坐标下的方位角 E ,俯仰角 A ,由船姿船位系统给出船姿态角(航向角 H 、纵摇角 P 和横摇角 R),由坐标变化公式,求出首摇、横摇、纵摇后天线在天线甲板极坐标系下的方位角 E_c 、俯仰角 A_c ,再求出与 E_c 有关的角 β 。

设两天线的连线 BC 与 OX_c 轴夹角为 ϵ ,过 BC 与 OX_c 的交点 G 做天线轴在船平面投影 CF, BK 的平行线,如图3所示,则 $\beta = \pi - |E_c - \epsilon|$ 。

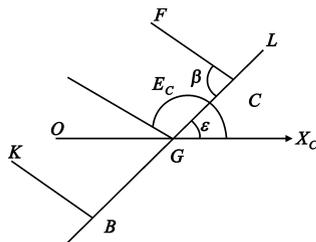


图3 β 与 E_c 的关系图
Fig.3 Relation between β and E_c

在四面体 $BCDF$ 中:

$$CD = BC \times \cos\beta / \cos A_c$$

$$BF = BC \times \sin\beta$$

$$DF = BC \times \cos\beta \times \text{tg}A_c$$

$$BD = \sqrt{BF^2 + DF^2}$$

在 $\triangle BCD$ 中,根据余弦定理得

$$\cos(\angle BCD) = [(BC^2 + CD^2 - BD^2) / (2 \times BC \times CD)]$$

两天线距离目标的距离差为

$$\begin{aligned} d &= CQ = BC \times \cos(\angle BCD) = \\ &BC \times [(BC^2 + CD^2 - BD^2) / (2 \times BC \times CD)] = \\ &BC \times \cos\beta \times \cos A_c = \\ &BC \times \cos(\pi - |E_c - \epsilon|) \times \cos A_c = \\ &-BC \times \cos(E_c - \epsilon) \times \cos A_c \end{aligned} \quad (1)$$

大地坐标系到甲板坐标系的转换公式

$$\begin{aligned} A_c &= \text{arctg}(O_{z_c} / O_{x_c}) = \text{arctg}(Z_c / X_c) = \\ &\text{arctg} \frac{\cos E [\cos R \sin(A - H) + \sin R \sin P \cos(A - H)] - \sin E \sin R \cos P}{\cos E \cos P \cos(A - H) + \sin E \sin P} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} E_c &= \arcsin \frac{O_{y_c}}{OM} = \arcsin \frac{Y_c}{r} = \\ &\arcsin \{ \cos E [\sin R \sin(A - H) - \cos R \sin P \cos(A - H)] \sin E \cos R \cos P \} \end{aligned} \quad (3)$$

将式(2)、(3)迭代入式(1)即可得出两天线指向目标的距离差与船摇角度的关系式。

3 仿 真

第 2 节推导出同一测量船上两天线对同一目标距离差值与船摇参数的数学模型,本节根据船摇的参数对两天线距离差值及差值变化速率进行仿真,将测量船某次海上跟踪目标时的实际船摇数据代入数学模型对两天线指向目标的距离差值及距离差速率进行仿真(仿真时取两天线距离 30 m、方位角 45° 、俯仰角 45°),两天线距离目标的距离差 d 随时间的变化如图 4 所示,对距离差值进行差分处理得出距离差值的变化率如图 5 所示。

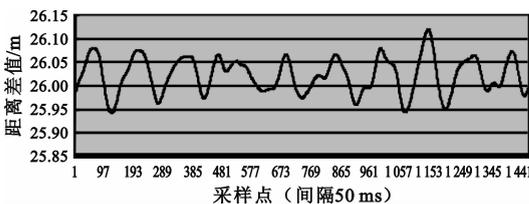


图 4 距离差随时间的变化关系图

Fig.4 Relation between range difference and time

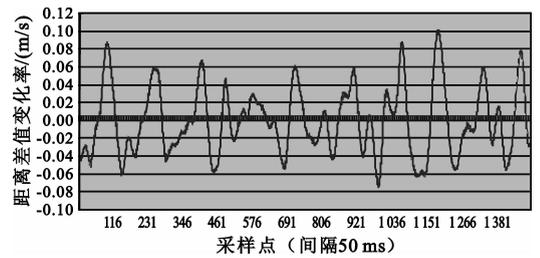


图 5 距离差的变化速率随时间变化关系图

Fig.5 Relation between speed of range difference and time

距离差值变化速率与天线方位、俯仰角度之间的变化关系如图 6 和图 7 所示。

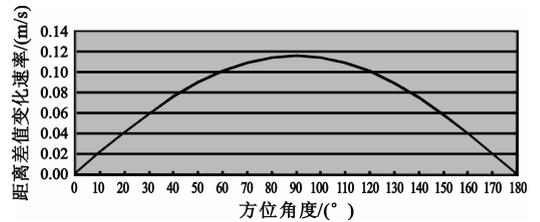


图 6 距离差的变化速率随 A 变化关系图

Fig.6 Relation between speed of range difference and antenna's azimuth angle

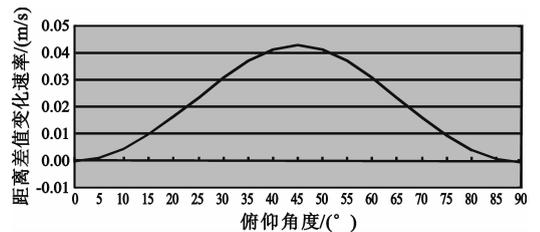


图 7 距离差的变化速率随 E 变化关系图

Fig.7 Relation between speed of range difference and antenna's pitch angle

从图 5、图 6 可以看出,组阵天线指向目标的距离差值变化速率与天线的方位、俯仰角度有关,可以通过改变天线的方位、俯仰角度来降低天线指向目标的距离差值变化率的绝对值,这为后续测量船舶测量工况的设计提供依据。

4 对天线组阵信号合成的影响分析

根据参与组阵的两个天线距离差值变化速率可以求出接收信号的相对相位差的变化率为 $360 \times v / c \times f(^\circ/s)$,其中 v 为速率差值, c 为光速, f 为信号频率。

参考第 3 节中车载组阵天线接收信号的相对距离差的变化仿真结果,我们取距离差的变化速率采

用 $v = 0.1 \text{ m/s}$ 。以 S 频段为例,信号合成采用全频谱合成方案^[5],信号频率 $f = 2.2 \text{ GHz}$,两个天线接收信号的相对相位差的变化为

$$360^\circ \times \frac{0.1(\text{m/s})}{3 \times 10^8(\text{m/s})/2.2 \times 10^9(/s)} = (120^\circ \times 2.2)/s = 0.264(^\circ/\text{ms})$$

一般来说,要完成两个信号之间相对相位差的测量,要求在相关运算时间内信号之间的相对相位差的变化不大于 45° 。所以,要求相关运算时间不大于 $45^\circ/0.264 = 170 \text{ ms}$ 。

同样高频(如 X)信号,设信号频率 8.5 GHz ,则两个天线接收信号的相对相位差的变化为

$$360^\circ \times \frac{0.1(\text{m/s})}{3 \times 10^8(\text{m/s})/8.4 \times 10^9(/s)} = (120^\circ \times 8.4)/s = 1.008(^\circ/\text{ms})$$

相应的相关运算时间不大于 $45^\circ/(1.008) = 45 \text{ ms}$ 。

从上述计算的结果分析,船摇对组阵天线信号合成的影响主要表现在参与组阵的天线指向目标的距离差值变化速率对全频谱信号相关时间的影响,船摇幅度越大,距离差值变化速率相应增大,信号频率越高,信号合成积分时间则越短,在较短的时间内要获得较为精确的信号相位差相对比较困难,因此信号合成的效率应不会很高;当频率提高到 Ka 频段时,相关运算时间仅为 10 ms 左右,基本无法进行信号合成。另外,积分时间与合成效率的关系还与接收机环路带宽有关,分析较为复杂,本文不作详细分析。

5 结束语

通过对单船多测控天线指向同一目标的距离差值随船摇变化的数学模型分析来看,组阵天线指向目标的距离差值变化速率可以通过改变天线的方位、俯仰角度来降低,本文研究成果为后续测量船舶测量工况的设计提供了依据。另外,组阵天线与飞行器的相对距离差值变化速率是影响船载高频测控天线组阵的关键因素,因此船载高频测控天线组阵研究必须对船体运动及船摇相关技术进行研究分析,如何克服船体运动及船摇来完成组阵天线间信号延迟量的测量与估计,是保证信号高效合成的关键技术,也是我们后续研究的重点。本文研究成果可为后续测量船装载高频测控天线组阵可行性认证提供技术参考。

参考文献:

- [1] 姚飞. 深空通信天线组阵关键技术及其发展趋势[J]. 宇航学报, 2010, 31(10): 2231 - 2238.
YAO Fei. Key Techniques and Development Trend of Antenna Arraying for Deep Space Communicat[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(10): 57 - 60. (in Chinese)
- [2] 洪家财. 天线下行组阵技术及其试验验证研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2011, 22(1): 58 - 62.
HONG Jia - cai. Study on Downlink Antenna Array Technology and Its Test Verifying [J]. Journal of Academy of Equipment command & Technology, 2011, 22(1): 58 - 62. (in Chinese)
- [3] 李海涛. 深空探测中的天线组阵技术[J]. 飞行器测控学报, 2004, 23(4): 57 - 60.
LI Hai - tao. Antenna array forming Technology in Deep space exploration [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2004, 23(4): 57 - 60. (in Chinese)
- [4] 张志远. 舰船姿态坐标变换及稳定补偿分析[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(4): 34 - 40.
ZHANG Zhi - yuan. Coordinate transformation of Warship-pose and analysis of stabilization compensation [J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(4): 34 - 40. (in Chinese)
- [5] 钟晓玲. 天线组阵信号合成技术的研究[J]. 遥测遥控, 2007, 28(增刊): 43 - 48.
ZHONG Xiao - ling. Research on the antenna arraying signal combining technique [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2007, 28(Suppl.): 43 - 48. (in Chinese)

作者简介:

毛南平(1970—),男,江苏靖江人,2004年获硕士学位,现为高级工程师,主要从事海上航天测控方面的研究;

MAO Nan-ping was born in Jingjiang, Jiangsu Province, in 1970. He received the M. S. degree in 2004. He is now a senior engineer. His research concerns spaceflight maritime TT&C.

Email: qixinmaomaoyu@163.com

李其福(1971—),男,安徽舒城人,2007年获硕士学位,现为高级工程师,主要从事海上航天测控方面的研究;

LI Qi-fu was born in Shucheng, Anhui Province, in 1971. He received the M. S. degree in 2007. He is now a senior engineer. His research concerns spaceflight maritime TT&C.

房新兵(1974—),男,江苏徐州人,2004年获硕士学位,现为高级工程师,主要从事海上航天测控方面的研究;

FANG Xin-bing was born in Xuzhou, Jiangsu Province, in 1974. He received the M. S. degree in 2004. He is now a senior engineer. His research concerns spaceflight maritime TT&C.

李培(1976—),男,江苏洪泽人,2000年获学士学位,现为工程师,主要从事海上航天测控方面的研究。

LI Pei was born in Hongze, Jiangsu Province, in 1976. He received the B. S. degree in 2000. He is now an engineer. His research concerns spaceflight maritime TT&C.