

文章编号: 1001 - 893X(2010)10 - 0108 - 04

和差极化方式不同导致跟踪问题的分析^{*}

周阳辉, 周朝猛, 章 剑

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘 要: 船载卫通站在不同海域跟踪 B 极化信标出现了相位渐变的现象, 根据双通道接收机跟踪原理进行公式推导, 证明当和差通道极化方式不一致时, 和差通道受环境和极化角影响导致的相位变化是反向的, 此时即使跟踪的是圆极化信标, 极化角的变化也会导致相位变化。

关键词: 船载卫通站; 极化方式; 自跟踪; 跟踪接收机; 单通道; 校相

中图分类号: TN820.4 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2010.10.021

Analysis of Tracking Problem Caused by Different Polarization Patterns of Sum and Difference Channels

ZHOU Yang-hui, ZHOU Chao-meng, ZHANG Jian

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

Abstract: The phase changed in the ship-board satellite station when tracing B polarization signal in different waters. According to the principle of dual-channel receiver tracking, it is known that when the sum and difference channels' polarization is inconsistent, the phase's change caused by the environment and the polarization angle is in the opposite direction. At this point even if the circular polarization signal beacon is tracked, the polarization angle's change will result in phase's change.

Key words: ship-board satellite station; polarization pattern; automatic tracking; tracking receiver; single-channel; phase-calibration

1 引 言

和差通道极化方式不一致的现象在地面站的工程应用中十分罕见, 即使出现这种情况, 也基本不影响通信, 因为大多数地面站无需跟踪。正因为如此, 和差极化方式不一致对跟踪的影响在许多参考书中没有相关的理论分析。某次出海执行任务中, 船载卫通站首次使用 60°E 星的圆极化 B 转发器。由于模拟接收机的设计缺陷, 在码头对 B 极化模式校相时, 和差通道均为 B 极化模式, 方位和俯仰误差信号中始终有一轴极性反相。采用和信号为 B 极化, 差通道为 A 极化方式, 才完成了校相。

在船航行过程中, 岗位人员发现接收机交叉耦

合特性持续恶化, 随即在海况较好的某海峡, 对接收机进行了重新校相, 此时接收机相位与码头时相比减少 80°左右, 说明相位值发生了严重变化, 并且随着地理位置的变化还会不断变化。

本文在单通道单脉冲自跟踪的基础上, 利用和差通道解调的数学模型, 对和差极化方式不一致导致相位变化的原因进行分析, 得出的结论为: 和差极化不一致时, 船载卫通站跟踪相位变化的原因是极化角和环境因素变化的共同作用。

2 原理阐述

2.1 馈电网络结构

跟踪接收机使用的信号可分为跟踪和信号和跟

^{*} 收稿日期: 2010 - 04 - 02; 修回日期: 2010 - 06 - 21

踪差信号,它们都来自于卫星信标信号,经和差网络合成成为一路信号送跟踪接收机。接收机校相就是在误差解调时,调整鉴相器相位以抵消跟踪和信号和跟踪差信号的初始相位差,从而使天线交叉耦合特性满足跟踪要求。

图 1 为天馈系统的组成框图。跟踪差信号由 TE₂₁ 模耦合器产生,耦合孔耦合出极化正交的左旋差信号 ΔL 和右旋差信号 ΔR 。和信号利用的是主模 TE₁₁ 模,直接通过 TE₂₁ 模耦合器无耦合^[1]。

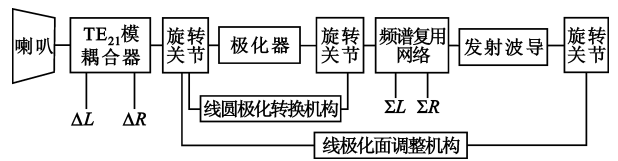


图 1 天馈系统组成框图

Fig.1 Block diagram of antenna and feed system

2.2 单脉冲单通道跟踪原理

当天线偏离卫星的角度 θ 足够小时,方位和俯仰的误差电压分别表示为

$$U_{Az} = k_f \rho \cos \phi \tag{1}$$

$$U_{El} = k_f \rho \sin \phi \tag{2}$$

式中, k_f 为相应的增益调节系数; ϕ 为卫星在与天线轴线相垂直的平面上,与轴线垂直点的连线在水平方向上的夹角(此参数代表误差信号的极性,表明天线偏离在卫星的哪个象限)。

单脉冲单通道跟踪主要利用了馈源波导中差模电磁场的天线方向图轴向为零值,偏轴有极性的特点来实现自动跟踪^[2]。和差信号可以表示为

$$E_{\Sigma} = b \cos \omega \tau \tag{3}$$

$$E_{\Delta} = b \mu \theta \cos(\omega \tau + \phi + \Delta \gamma) \tag{4}$$

式中, b 为和信号振幅, μ 为归一化误差信号斜率, ω 为馈源接收的信标信号频率, θ 为天线偏离卫星的角度, $\Delta \gamma$ 为合路前和差信号的相位差。

2.3 单通道接收机

双通道接收机虽然结构简单,实施方便,但是由于和差支路分别传输,两个支路的相位稳定性必须保持严格一致,否则容易产生交叉耦合。

单通道跟踪接收机是在双通道跟踪接收机的基础上,将差信号经过调制或混频等变换,抑制掉原有频率分量,然后将和、差信号加在一起,通过一个通道传输、变换、解调。单通道接收机的优点是合成后的信号在一个通道内传输,和、差信号的相对相移不

变,因此通道对和差信号产生同样的影响。

3 问题分析

3.1 坐标系和公式的重新建立

在第二节我们分析和差信号的表达式,许多参考书均使用此信号表达式。实际上,上述简易公式不具有一般性,其表达式有变量遗漏。由于地面站的极化角不变,正常的工程应用中,可以在计算中消掉,所以这些表达式都将极化角变量默认为零(变量在公式中不存在,即视作零),实际上极化角在移动地球站中属于变量。

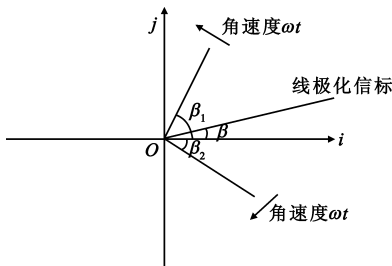


图 2 馈源喇叭接收信标矢量分解图

Fig.2 Vector decomposition map of signal beacon received by feed horn

图 2 是重建的复平面大地坐标系,跟踪用的都是线极化信标,该图将信标的极化分解状态完整地表达出来。其中, β 为极化角, β_1 、 β_2 为线极化分解的两个旋向相反的圆极化进入馈源后的初始相位,它们对于线极化信标对称,满足 $\beta_1 + \beta_2 = 2\beta$ (矢量的关系)。由此我们可以得到线极化信标和分解圆极化信标(均为和信号)的表达式分别为^[3]

$$E_{\text{线}} = b \cos \omega \tau e^{j\beta} \tag{5}$$

$$E_{\text{左圆}} = \frac{1}{2} b e^{-j\omega \tau} e^{j\beta_1} \tag{6}$$

$$E_{\text{右圆}} = \frac{1}{2} b e^{-j\omega \tau} e^{j\beta_2} \tag{7}$$

坐标系和公式的重新建立是本文的重点和理论推导的建模基础,理解上述内容有两点重要概念需要厘清:

(1) $\beta_1 + \beta_2 = 2\beta$ 表示的只是数量的传递关系,不是物理意义的传递。两圆初始相位和等于极化角大小的 2 倍,但不表示线极化信号的初始相位是 β , β 是线极化角度不是相位,线极化的相位只表现在振幅上;

(2) β_1 、 β_2 是随机变量,表示线极化信号进入馈

源的随机性, β 在某一地理位置是常数。

3.2 理论分析

3.2.1 相位渐变的原因

使用和差通道极化方式不一样的模式校相时, 和信号选 B 极化, 差信号选 A 极化, 由式(3)、式(4)、式(6)和式(7)可知, 在合路网络前的和差信号分别为^[4]

$$E_{\Sigma} = kb \cos(-\omega\tau + \beta_1 + \gamma_1) \quad (8)$$

$$E_{\Delta} = kb\mu\theta \cos(\omega\tau + \phi + \beta_2 + \gamma_2) \quad (9)$$

式中, γ_1 、 γ_2 为在合路器前和差信号分别通过路径的相位。

差信号经过方波调制后:

$$E_{\Delta} = kb\mu\theta \cos(\omega\tau + \phi + \beta_2 + \gamma_2) \times c(t) \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 调制后的差信号不含信标频率分量, 因此可以与和信号合为一, 合成后的信号经过放大、变频、锁相后, 变为

$$E_{\Sigma} + E_{\Delta} = kb \cos(-\omega_1\tau + \beta_1 + \gamma_1) + kb\mu\theta \cos(\omega_1\tau + \phi + \beta_2 + \gamma_2) \times c(t) \quad (11)$$

式中, k 为传输通道的电压增益, ω_1 为经过通道下变频后的和信号角频率。锁相环将频率、相位锁定于和信号, 得到用于解调的参考源输出信号为

$$u(t) = \cos(\omega_1\tau - \beta_1 - \gamma_1) \quad (12)$$

$u(t)$ 经过移相器(移相 γ)得到 $u_1(t)$, 再经过正交移相器(移相 $\frac{\pi}{2}$)得到 $u_2(t)$, 信号分别为

$$u_1(t) = \cos(\omega_1\tau - \beta_1 - \gamma_1 + \gamma) \quad (13)$$

$$u_2(t) = -\sin(\omega_1\tau - \beta_1 - \gamma_1 + \gamma) \quad (14)$$

相位检波器的实质是参考载波与输入信号相乘, 设相乘增益为 1, 则:

$$u_1(t) \times (E_{\Sigma} + E_{\Delta}) = \cos(\omega_1\tau - \beta_1 - \gamma_1 + \gamma) \times [kb \cos(-\omega_1\tau + \beta_1 + \gamma_1) + kb\mu\theta \cos(\omega_1\tau + \phi + \beta_2 + \gamma_2) \times c(t)] \quad (15)$$

式中, $\cos(\omega_1\tau - \beta_1 - \gamma_1 + \gamma) \times kb \cos(-\omega_1\tau + \beta_1 + \gamma_1)$ 一项为直流项, 一项为高频分量, 均不含有误差信号, 因此可以方便地滤除; 另一项: $\cos(\omega_1\tau - \beta_1 - \gamma_1 + \gamma) \times kb\mu\theta \cos(\omega_1\tau + \phi + \beta_2 + \gamma_2) \times c(t)$ 中的前两项相乘, 并滤除高频分量为 $\frac{1}{2} kb\mu\theta \cos(\phi + \beta_1 + \beta_2 + \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma)$, γ 是移相器移相值, 移相的目的就是消除相位差, 提取出 ϕ , 由此可得:

$$\gamma = \beta_1 + \beta_2 + \gamma_1 + \gamma_2 = 2\beta + \gamma_1 + \gamma_2 \quad (16)$$

正常工程应用中, 当和差极化一致时, 接收机的移相值是 $\gamma_1 - \gamma_2$ 。但当和差极化不一致时, 由式(16)可知, 接收机的移相值不仅与和差通道的相位和 $\gamma_1 + \gamma_2$ 有关, 还与线极化信标的极化角有关。极化角随着地理位置的变化而变化, 必然导致接收机相位变化。

3.2.2 其它因数对相位的影响

和差通道极化一致时, 接收机的移相值是 $\gamma_1 - \gamma_2$, $\gamma_1 - \gamma_2$ 属于差分变化, 变化量相互抵消, 校相后温度等环境因素的影响基本不会导致相位变化; 而 $\gamma_1 + \gamma_2$ 的相位变化量相互叠加, 温度等环境因素的影响不能忽略。这就得到如下结论: 当和差通道极化方式不一致时, 由于信号旋向相反, 环境因素导致和差通道相位变化, 其影响是叠加的。所以当和差通道极化方式不一致时, 随着地理位置的变化, 相位不但随极化角变化, 还应该和温度等环境因素有关。

合路后的单通道相位, 在正常的工程应用中可以消掉, 但当和差极化方式不一致时, 必须代入方程计算。图 3 是和差通道相位的简易示意图, γ_1 、 γ_2 是合路前和差信号的各自相位, $\Delta\gamma$ 是合路后单通道的相位。

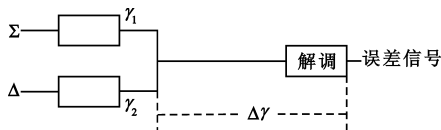


图 3 和差通道相位示意图
Fig. 3 Diagram of sum and difference channels' phase

假设海域一的校相值为 γ , 极化角为 β , 合路前和差信号的各自相位为 γ_1 、 γ_2 , 合路后单通道的相位是 $\Delta\gamma$; 海域二的校相值为 γ' , 极化角为 β' , 合路前和差信号的各自相位为 γ'_1 、 γ'_2 , 合路后单通道的相位是 $\Delta\gamma'$, 由式(15)可知:

$$\gamma = 2\beta + \gamma_1 + \gamma_2 + \Delta\gamma \quad (17)$$

$$\gamma' = 2\beta' + \gamma'_1 + \gamma'_2 + \Delta\gamma' \quad (18)$$

$$\gamma' - \gamma = 2(\beta' - \beta) + \gamma'_1 + \gamma'_2 - \gamma_1 - \gamma_2 + 2(\Delta\gamma' - \Delta\gamma) \quad (19)$$

这说明随着地理位置的变化, 相位不但随极化角变化, 还和温度等环境因素导致和差通道相位的变化值有关。

3.2.3 实测验证

对于这一结论, 我们用某型号任务记录数据进行了验证, 图 4 是某海域相位测量点, 测量点处的接收机相位与江阴码头时的相位值相比减少 80° 左右。

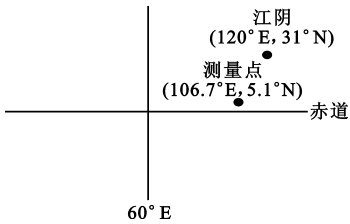


图 4 某海域相位测量点
Fig.4 Phase diagram of measurement points

极化角计算公式为 $\arctg \frac{\sin \Delta \delta}{\lg \epsilon}$, 其中 $\Delta \delta$ 是天线和卫星的经度差, ϵ 是天线所在地纬度^[5], 在江阴码头 $\phi = \arctg \frac{\sin 60^\circ}{\lg 31^\circ} = 55^\circ$, 在突变点 $\phi' = \arctg \frac{\sin 46.7^\circ}{\lg 5.1^\circ} = 83^\circ$, 由式 (19) 可以得到相位突变理论值为

$$\gamma' - \gamma = 2(\beta' - \beta) + \gamma'_1 + \gamma'_2 - \gamma_1 - \gamma_2 + 2(\Delta' \gamma - \Delta \gamma) = 80 \tag{20}$$

式中, 极化角变化量为 $2(\beta' - \beta) = 2(83 - 55) = 56^\circ$ 。
实测相位变化 80° , 极化角对应的相位变化量 56° , 其它因素导致的和差通道相位变化量为 24° , 这证明了随着地理位置的变化, 相位不但随极化角变化, 还和温度等因素有关。

4 结束语

如果将和差通道极化模式分别设置为 A、B 模式, 在码头可以顺利校相并且跟踪良好。但是出海后随着地理位置的变化, 交叉耦合会持续恶化, 直至无法跟踪。原因在于正常情况下跟踪圆极化信标不需要考虑极化角的变化, 但在和差极化模式不一致时, 极化角和环境因素的变化均会导致相位变化。这是测量船特有的隐患, 在相关专业书籍上都没有这一现象的描述, 因为地面站不存在地理位置的变化, 即使和差极化模式不一致也不会出现跟踪问题。所以, 作为测量船的卫通操作人员一定要理解 A、B 极化的区别, 制定严谨的倒换规程和严格的倒换步骤, 避免测量船在和差极化不一致的情况下出海。

参考文献:

[1] 柯树人. 圆波导线极化 TE11 模和圆极化 TE21 模自跟

踪体制[J]. 通信与测控, 2003, 27(1): 260 - 265.
KE Shu - ren. Circular waveguide mode linear polarization TE11 and TE21 mode auto - tracking system [J]. Communication and Control, 2003, 27(1): 260 - 265. (in Chinese)
[2] 李强. 单脉冲跟踪接收机研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.
LI Qiang. Research of Monopulse Tracking Receiver [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003. (in Chinese)
[3] 王雪松, 李永祯. 电磁波瞬态极化的统计特性[J]. 中国科学(E 辑), 2004, 34(8): 919 - 921.
WANG Xue - song, LI Yong - zhen. Statistical characteristics of electromagnetic wave polarization [J]. Science in China(Series E), 2004, 34(8): 919 - 921. (in Chinese)
[4] 李靖. TE21 模单通道自跟踪系统[J]. 无线电通信技术, 2005, 31(6): 43 - 44.
LI Jing. TE21 single - mode self - tracking system [J]. Radio Communications Technology, 2005, 31(6): 43 - 44. (in Chinese)
[5] 林培通. 卫星接收极化角计算公式的推导[J]. 宁德师专学报, 2004, 16(4): 400 - 402.
LIN Pei - tong. Satellite receiver polarization angle calculation formula [J]. Journal of Ningde Teachers College, 2004, 16(4): 400 - 402. (in Chinese)

作者简介:

周阳辉(1981 -), 男, 江苏盐城人, 2003 年获学士学位, 现为工程师, 主要从事远洋通信方面的研究;
ZHOU Yang - hui was born in Yancheng, Jiangsu Province, in 1981. He received the B. S. degree in 2003. He is now an engineer. His research concerns ocean communications.
Email: zhouyanghuihui@yahoo.cn
周朝猛(1955 -), 男, 江苏扬州人, 中国卫星海上测控部副总工程师, 主要从事无线电测控设备的研究和应用;
ZHOU Chao - meng was born in Yangzhou, Jiangsu Province, in 1955. He is now a vice chief engineer. His research concerns research and application of radio control equipment.
章 剑(1974 -), 男, 福建龙岩人, 1995 年获学士学位, 现为总体工程师, 主要从事通信和测控总体工作。
ZHANG Jian was born in Longyan, Fujian Province, in 1974. He received the B. S. degree in 1995. He is now an engineer. His research concerns the overall work of communications and monitoring.