

文章编号:1001-2486(2009)01-0095-04

GPS 单孔径双极化天线抗干扰算法与性能分析*

战永红,李双勋,王展,程翥,路君里

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要:设计了一种利用单孔径双极化天线进行 GPS 自适应抗干扰的方法,并对算法的性能进行了详细的分析。新方法在不降低卫星信号质量的前提下,仅占用单个天线位置,就可以对付窄带或宽带干扰,为增强安装受限装备的导航抗干扰能力提供了一种新的解决方案。仿真结果表明,新方法可行、有效。

关键词:全球定位系统;自适应处理;单阵元双极化天线;抗干扰

中图分类号:TN911.7 文献标识码:B

Algorithm and Performance Analysis of GPS Single Dual-polarized Antenna Anti-jamming

ZHAN Yong-hong, LI Shuang-xun, WANG Zhan, CHENG Zhu, LU Jun-li

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A more efficient adaptive GPS anti-jamming algorithm is designed by utilizing single dual-polarized antenna and its performance is discussed. While keeping intact the quality of the expected navigation signal, the new algorithm is able to do with either narrow or wide jamming while only occupying a single antenna position. Therefore, the new algorithm presents a better solution for improving anti-jamming ability of the small volume equipment. Simulation result shows that the new algorithm is feasible and efficient.

Key words: GPS; adaptive processing; single dual-polarized antenna; anti-jamming

当前,在 GPS 卫星导航信号抗干扰系统中,得到广泛应用的抗干扰技术有单天线时域滤波技术、多天线空域零陷技术和多天线空时处理技术等^[1-2]。单天线时域滤波抗干扰技术的优点是只有单个天线,体积小,便于安装于各种载体上;缺点是只能抗窄带干扰,不能抗宽带干扰。基于多天线的空域零陷技术与空时处理技术的优点是可以同时抗窄带、宽带干扰,但缺点是由于在干扰方向天线波束形成零陷,因此当干扰与卫星信号来波方向相同或者夹角很小时,卫星信号将同样被抑制掉;而且由于阵列抗干扰能力受到阵元数目的限制,在多个天线阵元同时存在的条件下,阵列不利于安装在空间有限的载体上,如小型飞行器等,以至于多阵元抗干扰系统的应用受到一定的限制。

兼顾单天线体积小、适装性强与多天线可以抗宽带干扰的优点,我们在导航信号抗干扰系统中采用单孔径的双极化天线,并利用该天线得到的两路极化信息设计一种干扰信号的对消算法。这种基于单孔径双极化的自适应抗干扰算法,不仅可以抗窄带或宽带干扰,而且由于其仅占有单个天线位置,因此具有便于安装在各种载体上的优点。

1 单孔径双极化天线抗干扰算法

近年来,电磁波极化信息的应用得到了突飞猛进的发展^[3],利用极化技术已经成为雷达抗干扰的一种有效手段^[4-6]。在导航信号处理领域,利用信息的极化信息进行抗干扰处理,是否能够获得同样的抗干扰性能,是否会降低卫星信号质量,要详细讨论的问题。

在卫星导航信号自适应抗干扰系统中,由于卫星信号功率远低于热噪声功率,因此常用的处理准则是最小输出功率准则^[1]。在极化自适应抗干扰中我们采用同样的准则。设计利用信号极化信息进行干

* 收稿日期:2008-03-28

基金项目:国家部委预研项目

作者简介:战永红(1967—),男,博士生。

扰对消的滤波器结构如图1所示(其中DDC表示数字下变频器)。把其中一路极化信号作为参考信号 d ,另一路极化信号作为输入信号 x ,自适应权值为 w ,对消之后输出为 e 。假设源信号进入正交极化双通道的表达式为

$$\begin{cases} E_x = A_x \cdot e^{j\phi_x} + n_1 \\ E_y = A_y \cdot e^{j\phi_y} + n_2 \end{cases} \quad (1)$$

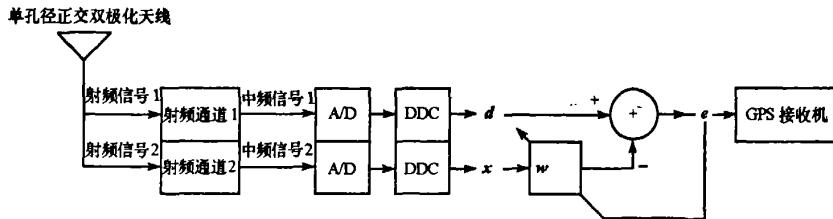


图1 对消器结构框图

Fig. 1 The diagram of the canceller

式中, A_x, A_y 为两路信号的振幅; ϕ_x, ϕ_y 为两路信号的相位; n_1, n_2 分别为均值为零、功率为 σ_n^2 的高斯白噪声。源信号与噪声互不相关,不同极化方式的噪声互不相关。对式(1)做归一化处理得到

$$\begin{cases} E_x = E \cos \gamma + n_1 \\ E_y = E \sin \gamma e^{j\eta} + n_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $E = \sqrt{A_x^2 + A_y^2} \cdot e^{j\phi_x}$, $\tan \gamma = \frac{A_y}{A_x}$, $e^{j\eta} = e^{j(\phi_y - \phi_x)}$ 。文中选择 E_x 为参考信号, E_y 为输入信号,则得到

$$d = E_x = E \cos \gamma + n_1 \quad (3)$$

$$x = E_y = E \sin \gamma e^{j\eta} + n_2 \quad (4)$$

通过自适应地调整权值 w ,让输出误差 e 的功率最小,并最终达到对消干扰的目的。

2 抗干扰算法性能分析

本文在导航信号处理中,利用信号的极化信息对干扰进行抑制,其本质是利用两路正交极化信号的一路在最小输出功率准则下对另一路进行估计并通过求差值来达到消除干扰的目的。这样设计的问题是:干扰对消的同时GPS信号会不会也同样被抑制,换言之,这种处理方式是否会降低卫星信号质量?

由于采用最小输出功率准则作为极化对消准则,因此对抗干扰滤波器的输出误差信号的能量求期望,得到

$$\epsilon = E[|e|^2] = E[(d - wx)(d - wx)^*] = E[dd^* - dx^*w^* - d^*xw + |w|^2xx^*] \quad (5)$$

如果令权值矢量 w 的分解形式为

$$w = a + bj \quad (6)$$

把式(3)、(4)、(6)代入式(5)并化简得到

$$\begin{aligned} \epsilon = & E[|E|^2 \cos^2 \gamma + |n_1|^2 - |E|^2 \cos \gamma \sin \gamma e^{-j\eta} (a - bj) \\ & - |E|^2 \cos \gamma \sin \gamma e^{j\eta} (a + bj) + (a^2 + b^2) (|E|^2 \sin^2 \gamma + |n_2|^2)] \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)分别对 a, b 求偏导并置为0得

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial a} = -E(|E|^2 \cos \gamma \sin \gamma e^{-j\eta}) - E(|E|^2 \cos \gamma \sin \gamma e^{j\eta}) + 2E(a)E(|E|^2 \sin^2 \gamma + |n_2|^2) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial b} = E(|E|^2 \cos \gamma \sin \gamma e^{-j\eta} \cdot j) - E(|E|^2 \cos \gamma \sin \gamma e^{j\eta} \cdot j) + 2E(b)E(|E|^2 \sin^2 \gamma + |n_2|^2) = 0 \quad (9)$$

式(8)、(9)相加得到

$$-E(2|E|^2 \cos \gamma \sin \gamma e^{-j\eta}) + 2E(w)E(|E|^2 \sin^2 \gamma + |n_2|^2) = 0 \quad (10)$$

若令 $E(|E|^2) = \sigma_s^2$, $E(|n_2|^2) = \sigma_n^2$ (噪声功率为 σ_n^2),且 $\sigma_s^2/\sigma_n^2 \triangleq \text{JNR}$ (JNR表示干扰噪声比),则化

简式(10),可以得到权值 w 的最佳估计表达式为

$$\hat{w} = E(w) = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2 \sin^2 \gamma + \sigma_n^2} \cos \gamma \sin \gamma e^{-j\eta} = \frac{\cos \gamma \sin \gamma e^{-j\eta}}{\sin^2 \gamma + \frac{1}{JNR}} \quad (11)$$

分析最佳权值估计表达式(11)容易知道:当 $\gamma = 0$ 或 $\gamma = \pi/2$ 的时候,都会出现 $\hat{w} = 0$ 的极端情况。这表明天线接收到的干扰信号极化方式的不同可能会影响实际的抗干扰性能,而这个影响有多大,需要进一步讨论。为此,我们把得到的最佳权值估计表达式(11)代入到误差能量表达式(7)并化简得到

$$\epsilon = E(|e|^2) = \frac{\sigma_n^2 \left(1 + \frac{1}{JNR} \right)}{\sin^2 \gamma + \frac{1}{JNR}} \quad (12)$$

由式(12)可以得到以下结论:

(1)当干扰噪声比 $JNR \rightarrow \infty$ 时,对消器输出误差功率值取决于噪声功率 σ_n^2 与 $\sin^2 \gamma$ 的比值。这说明当前工作条件下,误差输出功率将随着 γ 的减小而变大,特别是当 $\gamma = 0$ 时误差输出功率为无穷大,对消器输出信号将无法让 GPS 接收机正常工作。这种特殊情况表明,辐射到正交极化天线上的干扰信号只有 x 极化分量,没有 y 极化分量,因而,所设计的这种抗干扰方式将无法完成对这种特殊干扰(干扰信号的极化方式为线极化且与天线 x 极化方向重合)的对消。但在实际的工作环境中,由于 GPS 接收机一般处于运动中,干扰信号的极化方向总会与天线的正交极化方向形成一定的夹角,因此我们认为这种极端的特殊情况发生的概率很小,基本可以忽略不计。

(2)当干扰噪声比很小且 $\gamma \neq 0$ 时,对消器输出误差功率趋近于噪声功率 σ_n^2 。由于 GPS 卫星信号的信噪比通常低于 -23 dB,因此对消器输出误差功率将接近于热噪声功率,满足 GPS 接收机的输入条件,不会影响其正常工作。

3 仿真与实验结果

为了进一步验证所设计的导航信号抗干扰方法的有效性以及对抗干扰算法性能分析的正确性,这里给出仿真实验结果。

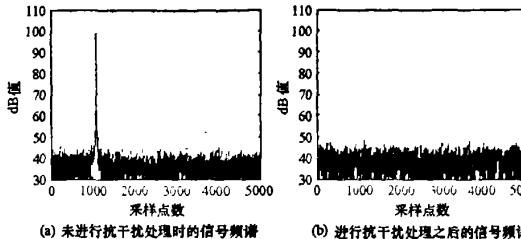


图 2 点频干扰抗干扰性能

Fig.2 The anti-jamming performance of the point jamming

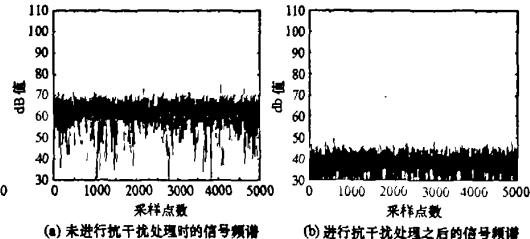


图 3 宽带干扰抗干扰性能

Fig.3 The anti-jamming performance of the wide jamming

(1)图 2 给出了单孔径双极化天线对点频干扰进行抑制的试验结果,仿真中选取干扰信号的极化方式为圆极化,即 $\gamma = \pi/4, \eta = \pi/2$;信号采样率 $f_s = 4.092$ MHz;干扰信号零中频频率为 900 kHz;干扰噪声比为 50 dB。结果表明,该方法对于点频干扰具有较好的抗干扰性能。

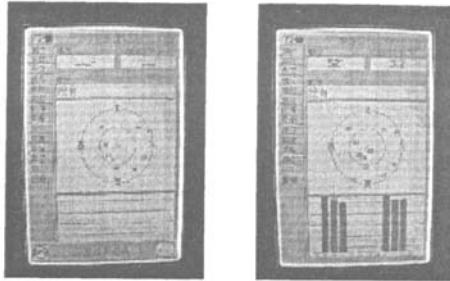
(2)图 3 给出了单孔径双极化天线对宽带干扰进行抑制的试验结果,仿真中选取干扰信号的极化方式为圆极化,即 $\gamma = \pi/4, \eta = \pi/2$;信号采样率 $f_s = 4.092$ MHz;干扰信号带宽为全带宽;干扰噪声比为 30 dB。结果表明,该方法对于宽带干扰具有较好的抗干扰性能。

(3)表 1 给出了不同干噪比条件下,极化抗干扰算法对点频干扰的抑制程度,仿真条件与(1)相同。结果表明,该方法对于较高干噪比(-10 dB 以上,通常是干扰信号)的信号具有较好的抑制能力,而对于较低干噪比(-20 dB 以下,通常为 GPS 卫星信号)的信号,基本没有抑制。GPS 卫星信号的信噪比通常在 -23 dB 左右,因而利用信号的极化信息对干扰进行抑制基本不会给 GPS 卫星信号带来影响。

表1 不同干噪比条件下,算法对干扰的抑制程度
Tab. 1 The ability of anti-jamming in condition of different JNR

干噪比(dB)	40	30	20	15	10	5	0
干噪比降低(dB)	40	30	21	16	12	8.5	6
干噪比(dB)	-5	-10	-15	-20	-23	-25	-30
干噪比降低(dB)	3.8	2.6	1.4	0.8	0.3	0.3	0.3

(4) 图4给出了利用单孔径双极化天线进行抗干扰实验的实测结果, GPS接收机型号为GARMIN182, 结果表明, 极化抗干扰有效抑制了干扰, 且对消结果没有给GPS接收机的正常工作带来影响。



(a) 未经抗干扰工作情况 (b) 经极化抗干扰后工作情况

图4 干扰约为-90dBm时极化处理前后GPS接收机的工作情况

Fig. 4 The state of the GPS receiver under -90dBm jamming

4 结论

无论是单天线的时域滤波技术, 还是多天线的空时或纯空域处理技术, 它们在导航信号抗干扰的应用中都有优缺点。本文兼顾两种方法的优点, 提出了一种利用单孔径双极化天线进行导航信号抗干扰的方法。通过对算法性能的分析以及仿真实验, 验证了新方法不仅可以抗窄带干扰, 还能抗宽带干扰, 更为重要的是大大缩小了天线的安装体积, 为小型飞行器配备具有较强抗干扰能力的导航系统提供了新的解决方案。

参 考 文 献:

- [1] 孙晓昶, 皇甫塔, 程翥, 等. GPS接收机联合空时抗干扰方法[J]. 通信学报, 2003, 24(9): 93-102.
- [2] 李双勋, 程翥, 薛鸿印, 等. 联合空时抗干扰天线阵的快速实现方法[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(3): 39-44.
- [3] 曾清平, 董天临, 万山虎. 极化雷达的发展动态与极化信息的应用前景[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(6): 669-673.
- [4] Ghirardelli M. Adaptive Polarization Suppression of Intentional Radar Disturbance[J]. IEEE Proc - F, 1990, 137(6): 407-416.
- [5] Wang X S, Xiao S P, Tao H M, et al. Nonlinear Optimization Method of Radar Target Polarization Enhancement[J]. Progress in Natural Science, 2000, 10(1): 136-140.
- [6] 施龙飞, 王雪松, 徐振海, 等. APC迭代滤波算法与性能分析[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(9): 1560-1564.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>