

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.10.019

引用格式:刘汉超,梁昊.卫星移动通信系统低信噪比抗干扰数字接收机设计[J].电讯技术,2014,54(10):1418-1423.[LIU Han-chao, LIANG Hao. Design of an Anti-interference Digital Receiver for Satellite Mobile Communication Systems in Low SNR Application[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(10):1418-1423.]

卫星移动通信系统低信噪比抗干扰数字接收机设计*

刘汉超^{1,2,3,**}, 梁昊^{1,2}

- (1. 中国科学技术大学 核探测与核电子学国家重点实验室, 合肥 230026;
2. 中国科学技术大学 近代物理系 物理电子学安徽省重点实验室, 合肥 230026;
3. 北京空间信息中继传输技术研究中心, 北京 100094)

摘要:针对阵列天线卫星移动通信抗干扰能力差、传播损耗大等特性,设计了一种数字波束形成技术(DBF)和扩频技术相结合的数字接收机。其中,DBF算法采用基于递归最小均方算法(RLS)的解扩重扩盲自适应波束形成算法,使用VxWorks实现权值计算,FPGA实现波束形成;扩频方式采用直接序列扩频,在FPGA中实现。仿真分析与样机测试显示,通过两项技术联合使用,在信噪比低至-45 dB条件下仍可以实现可靠通信,同时有效加强了系统抗干扰能力。

关键词:卫星移动通信;阵列天线;数字接收机;盲自适应波束形成;直接序列扩频

中图分类号:TN927 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)10-1418-06

Design of an Anti-interference Digital Receiver for Satellite Mobile Communication Systems in Low SNR Application

LIU Han-chao^{1,2,3}, LIANG Hao^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. Anhui Key Laboratory of Physical Electronics, Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
3. Beijing Space Information Relay and Transmission Technology Research Center, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to improve the anti-interference ability and reduce the propagation loss for the multi-antenna satellite mobile communication, a novel digital receiver is proposed. This receiver combines the digital beamforming (DBF) technology and the spread spectrum technology. The DBF algorithm is adaptive blind beamforming based on the recursive least square (RLS) method and the despread-respread method, which is implemented by VxWorks and FPGA. The spread spectrum mode is direct sequence (DS) spread spectrum, which is implemented by FPGA. Simulation and prototype test results show that the digital receiver can ensure the reliability of satellite communication at lower signal-to-noise ratio (under -45 dB) and improve the anti-interference ability.

Key words: satellite mobile communication; array-antenna; digital receiver; adaptive blind DBF; direct sequence spread spectrum

1 引言

在卫星移动通信迅速发展的今天,阵列天线的

应用为卫星移动通信提供了更宽范围的覆盖,而且可以进行用户扩展,能为用户的无线连接提供更大

* 收稿日期:2014-05-20;修回日期:2014-07-25 Received date:2014-05-20;Revised date:2014-07-25

** 通讯作者:liuhc1988@hotmail.com Corresponding author: liuhc1988@hotmail.com

的自由度,并能支持用户的移动性。大容量、多波束、智能化是阵列天线卫星移动通信的优势,但是卫星移动通信工作环境差,传输距离远,传输媒介不稳定,因此,如何在超低信噪比下实现可靠的卫星通信以及如何抗干扰成为现在移动通信研究的主要方向。

文献[1]提出数字波束形成(DBF)技术用于抗干扰和提高信噪比的性能,文献[2-3]提出在 DS-CDMA 系统中,扩频系统固有的冗余度同样可以实现抵抗严重干扰的能力。而本文就抗干扰性能和在超低信噪比下可靠通信两方面提出了一种数字接收机的设计方案,将 DBF 技术和扩频技术联合应用到该数字接收机中。首先,DBF 通过天线调零技术只在期望用户方向形成波束,在干扰用户方向形成零陷;其次,扩频技术通过期望用户所使用的 PN 码的正交性,对剩余干扰进行抵消处理。通过两项技术的联合使用,大大提高了系统抗干扰性能。另外,扩频增益及 DBF 的合成增益保证了超低信噪比下信号的捕获及跟踪。DBF 算法采用改进的基于递归最小均方算法(RLS)的解扩重扩盲自适应波束形成算法,扩频技术采用直接序列扩频。

2 系统分析

数字接收机是卫星通信系统中的一个重要组成部分,针对阵列天线卫星通信系统,本文设计的数字接收机由 M 路通道组成,结构组成如图 1 所示。 M 路天线接收信号经变频放大后,得到 M 路中频信号作为接收机的输入信号,接收机首先对 M 路中频信号进行放大滤波、ADC 采样、数字下变频后,得到 M 路基带 I/Q 信号,然后进入 DBF 及数字解扩解调模块,接着将输出的基带信号送入译码模块,最后 Vx-Works 读取译码数据送给上层。除去变频、采样、译码等成熟技术,该接收机的关键技术就在于 DBF 及数字解扩解调模块的实现,即数字波束形成和扩频解扩技术的联合实现方法,下文着重对该关键技术进行分析。

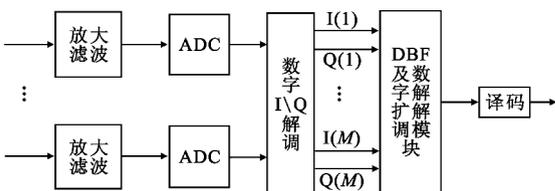


图 1 接收机结构框图
Fig. 1 Block diagram of the receiver

近年来,卫星通信中提出的 DBF 算法很多,包括 LMS、DMI 算法等^[1,4]。但大多数算法都只是有仿真结果,并未有工程实践。文献[4]提出了 CDMA 系统下的解扩重扩盲自适应波束形成算法,该算法可以根据用户专有的 PN 码序列生成伪训练序列进行波束合成,因此可以大大节约系统信道带宽,但其迭代算法是分块处理的,无法应用于实时系统。在此基础上,本文采用改进的基于 RLS 的解扩重扩盲算法,对用户的跟踪可以呈现实时特性,且不需要进行矩阵直接求逆运算,其运算复杂度、收敛速度等方面要远优于 LMS、DMI 算法。整个算法的实现框图如图 2 所示,接收信号矢量为 $x(n)$,DBF 合成使用的权向量为 $w(n)$, $y(n)$ 表示 DBF 合成结果, $d(n)$ 表示对 $y(n)$ 进行解扩、判决、重扩后的信号, $c(n)$ 表示所需信号的扩频码,码周期为 L_c , $\text{dec}[\cdot]$ 表示判决函数, $\varepsilon(n)$ 表示迭代误差。

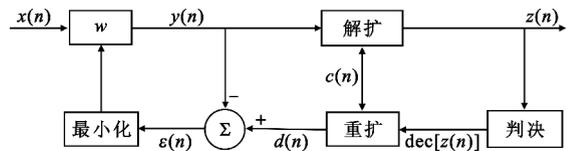


图 2 基于 RLS 的解扩重扩算法
Fig. 2 Despread-respread method based on RLS

整个算法处理流程如下:

- (1) 根据期望用户位置产生初始权值 $w(0)$:

$$w(0) = [w_{0,1}, \dots, w_{0,m}, \dots, w_{0,M}]$$

$$w_{0,m} = \cos(\theta_m) + j \cdot \sin(\theta_m)$$

$$\theta_m = \frac{2\pi k}{\lambda} [P_x(m) \cos(\alpha) + P_y(m) \sin(\alpha)] \sin(\beta),$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$

其中, α 表示期望用户初始方位角, β 表示期望用户初始俯仰角, k 表示介电常数, λ 表示波长, $[P_x(m), P_y(m)]$ 表示第 m 根天线位置;

- (2) 根据 $y(n) = w^H(n)x(n)$ 得到合成后信号 $y(n)$;

(3) 将合成后数据送入基带码捕获模块,码捕获模块对 $y(n)$ 进行快速码捕获,捕获成功后,进行码同步和解扩。注意,此处只有在初始时需要进行码捕获,码捕获成功后,即可正常工作,只要信道不产生突变,则不需要重新捕获,数据直接进行解扩。将解扩后数据 $z(n)$ 送入解调器进行判决,得到比特序列 $b(k)$:

$$b(k) = \text{dec} \left[\frac{1}{L_c} \sum_{m=0}^{L_c-1} y(L_c \lfloor n/L_c \rfloor + m) c(m) \right]$$

其中, $\text{dec}[\cdot]$ 表示判决函数, $\lfloor \cdot \rfloor$ 代表取整运算。

(4) 对比特序列 $b(k)$ 进行与发射端相同的调制和扩频, 获得扩频后数据 $d(n)$, 即伪训练序列。假设采用 BPSK 调制方式, 伪训练序列 $d(n)$ 可以表示为

$$d(n) = c(n \bmod L_c) b(k)$$

其中, \bmod 表示取余运算;

(5) 计算误差函数 $\varepsilon(n) = d(n) - y(n)$;

(6) 依据 RLS 算法最小化 $\varepsilon(n)$, 得到权系数 $w(n+1)$;

$$w(n+1) = w(n) + q(n+1) \varepsilon(n)$$

$$q(n+1) = \frac{\lambda^{-1} \hat{R}_{xx}^{-1}(n) x(n+1)}{1 + x^H(n+1) \lambda^{-1} \hat{R}_{xx}^{-1}(n) x(n+1)}$$

$$\hat{R}_{xx}^{-1}(n) = \lambda^{-1} [\hat{R}_{xx}^{-1}(n-1) - q(n) x^H(n) \hat{R}_{xx}^{-1}(n-1)]$$

其中, $q(n)$ 表示 RLS 算法的滤波增益向量, 是一个系数向量; $\hat{R}_{xx}^{-1}(n)$ 是接收信号的协方差矩阵, 为遗忘因子。注意, 在开始迭代之前, 需要将 $\hat{R}_{xx}^{-1}(n)$ 初始化为 $M \times M$ 维的单位阵 I , 引入遗忘因子 λ 是为了能够跟踪时变信道的缘故。当信道时变速率较慢时, 可以使用较大的 λ ; 否则, 选用较小的 λ ;

(7) 更新权值, 跳回步骤 2, 重复上述过程, 实现对移动用户的实时跟踪。

3 系统设计与实现

自适应波束形成技术算法比较复杂, 含有大量的乘法、除法和三角函数运算, 使用 FPGA 会消耗大量资源。嵌入式系统作为控制、监视或者辅助控制设备运行的系统, 它是软件和硬件的结合体, 适用于对功能、可靠性、体积和功耗要求都比较严格的专用计算机系统^[5]。因此, 在本文中使用实时操作系统 VxWorks 来实现数字波束的权值计算, FPGA 实现波束合成、PN 码的捕获、同步、解扩、重扩及判决。根据前一节叙述的算法, 整个系统处理流程划分如下:

(1) Vxworks 完成波束合成权系数的计算、更新、转换以及送入 FPGA;

(2) 接收信号 $x(n)$ 通过 FPGA 的 DBF 合成模块得到合成后数据 $y(n)$, 并将 $x(n)$ 送入 FIFO 中;

(3) 在 FPGA 中将合成后数据送入基带码捕获模块, 捕获成功后, 对 $y(n)$ 进行解扩解调, 得到比特流 $b(k)$; 然后, 对比特流数据 $b(k)$ 进行调制、扩频、成型, 得到 $d(n)$, 并完成重构后数据 $d(n)$ 与合成后数据 $y(n)$ 的误差 $\varepsilon(n)$ 计算, 并将 $\varepsilon(n)$ 送入 FIFO 中; 同时将比特流 $b(k)$ 送入译码模块, 译码后数据也送入 FIFO;

(4) Vxworks 从 FIFO 中分别取出 $\varepsilon(n)$ 和 $x(n)$, 根据算法计算公式, 计算 $w(n+1)$, 更新波束合成权系数; 同时将另一个 FIFO 中存储的译码后数据取出, 送入上层。

(5) Vxworks 读取基带解扩模块状态, 如果码捕获模块失锁, 即当前波束合成权系数无法正确跟踪用户, 转回步骤 1, 采用开环计算; 若基带解扩模块一直处于码捕获成功状态, 即可以有效跟踪用户, 则回到步骤 2, 继续对用户进行跟踪; 重复上述步骤。

下面将详细介绍权系数计算的 VxWorks 部分、解扩模块中的码捕获部分以及波束形成的 FPGA 部分的设计和实现方法。

3.1 权系数计算模块

本文权系数计算模块采用的是 VxWorks5.5, 开发环境为 Tonordo2.21。首先, VxWorks 接收到系数计算指令, 分离出用户的初始位置, 然后根据用户的初始位置计算出初始权系数。在 FPGA 中使用浮点型处理太耗资源, 于是将浮点型转换为 32 比特的无符号长整型数。最后, 通过 CPCI 总线将无符号长整型的权系数写入 FPGA 的权系数 RAM 中。流程图如图 3 所示。

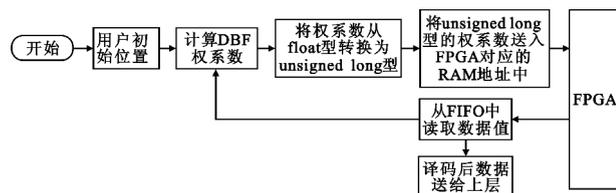


图3 数字波束形成系数计算流程图

Fig. 3 Flow chart of the computation of DBF weights

(1) 根据初始用户位置计算出初始权系数 $w(0)$;

(2) 将 $w(0)$ 转换为长整型, 送入 FPGA 中 DBF 权系数模块;

(3) 从 FIFO 中读出误差 $\varepsilon(n)$ 和 $x(n)$, 送入权值计算模块, 将译码后数据成帧送给上层;

(4) 根据第 2 节给出的算法计算出权值 $w(n+1)$;

(5) 将 $w(n+1)$ 转换为无符号长整型的权系数写入 FPGA 的权系数 RAM 中。

3.2 码捕获模块

码捕获模块采用 FPGA 实现, 开发环境为 Quartus11.0。其基本原理^[6-7]就是利用伪码的自相关特性, 计算并比较伪码在 $2N$ 个相位状态下的相关值,

N 是扩频码的长度。若某一相位的相关值超过门限值,则判定此相位为接收伪码的相位。在一般的通信环境下使用匹配滤波来捕获接收伪码相位只需要几个伪码周期即可完成,因此匹配滤波法相对于滑动相关法捕获时间较短。由于接收机工作在低信噪比的场合,因此需要通过多周期累积的方式使匹配滤波的输出能够达到足够高的信噪比完成捕获。如图 4 所示,先对 I、Q 两路数据进行相干累积,累积结果求模值后再进行非相干累积,可以缩短捕获时间。但是这种累积方式是建立在没有多普勒频偏的基础上设计的,实际发送端和接收端之间的相对移动会导致存在残余频偏,相关峰值将会恶化,影响码捕获。所以,在累积之前必须消除掉多普勒频偏。由于频移是未知的,本文通过频率搜索方法来确定。

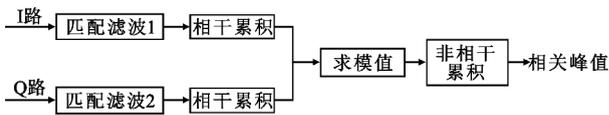


图 4 匹配滤波与多周期累积设计框图
Fig. 4 Block diagram of the matching filter and multi-cycle accumulation

图 5 为码捕获的主要实现方法,其中频率搜索方式为串并结合的方式, DBF 形成后的数据分为 $2N+1$ 路,并行地进行 PN 码捕获,第 1 路数据频谱搬移 $f_0 - Nf$,第 $2N+1$ 路数据频谱搬移 $f_0 + Nf$ 。搬移后的数据送入匹配滤波器,匹配滤波器输出的数据通过包络检测器得到相关峰值,多路信号的相关峰送入判决器,采用最大值检测法,判决器存储最大值,并控制频率字 f_0 ,依次循环到所有频率点都搜索完毕。找出最大值,并对最大值进行判决,判定是否捕获成功,从而实现码捕获功能。

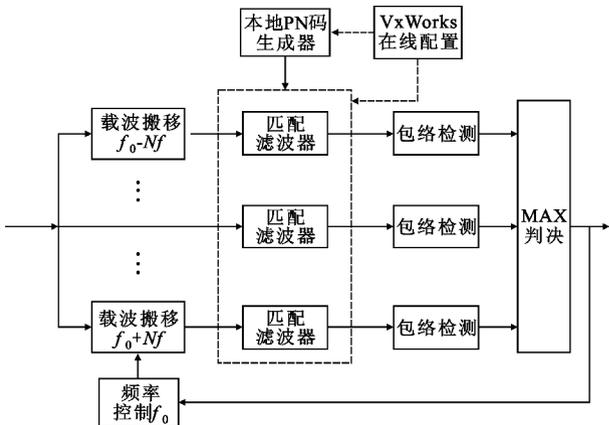


图 5 码捕获模块的设计与实现框图
Fig. 5 Block diagram of the code acquisition module

3.3 数字波束形成模块

数字波束形成模块采用 FPGA 实现,开发环境为 Quartus11.0。在进行 DBF 形成时,每一路信号与权系数相乘时都需要一个复数乘法器,复数乘法器的个数随着天线单元数的增加而增加^[8-9]。当天线单元个数较大时,消耗的资源非常多。为了提高资源利用率,本文采用流水线形式,将 L 路 ($2 \leq L \leq M$) 并行信号变成一路串行信号,同时将对应的权系数也串行成一路信号,将这两路串行信号送入一个高速复数乘法器。高速乘法器输出的数据可以送入对应的高速累加器,给出一个信号使能来控制累加的开始。最后,将累加的数据送入一个并行加法器。加法器的输出就是 DBF 合成后的结果。而多路信号累加时,如果直接扩位,会导致后面的运算太耗资源,因此,需要进行截位。信号过小时,高位没有使用,可以截掉高位;信号过大时,低位的结果相对高位可以忽略不计,可以截掉低位。因此,在加法器后面加入自动增益控制器来控制选取相应的比特位输出。波束合成模块的具体设计流程如图 6 所示。

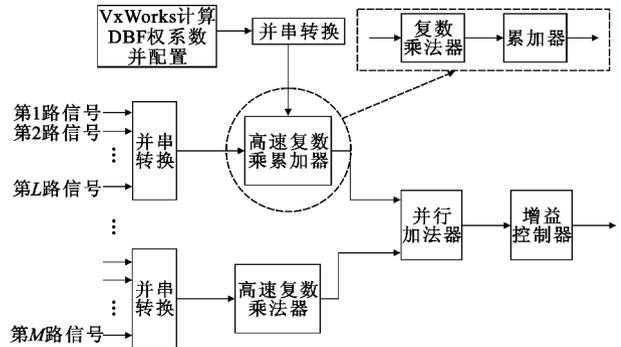


图 6 数字波束合成模块的 FPGA 设计与实现框图
Fig. 6 FPGA design block diagram of digital beamforming

4 性能仿真及测试

4.1 波束形成算法仿真

本文接收机使用的数字波束形成算法是基于 RLS 的解扩重扩盲自适应波束形成算法。图 7 显示,在不知道用户真实位置的前提下,算法可以自适应地将波束指向用户的真实位置,同时有抵消干扰信号的能力。其中用户角度为 10° ,干扰用户角度为 -40° ,系统信噪比为 -10 dB。结果表明数字波束形成在 10° 角内形成主波束,旁瓣抑制效果良好,同时在 -40° 处实现对干扰用户的抵消。由于算法的矩阵求逆运算,即波束合成的权系数计算部分在

VxWorks 中实现,运算速度要远远高于在 FPGA 中实现,大大提高了收敛速度。且该方法不需要显示的训练序列,提高了信道的可利用率。

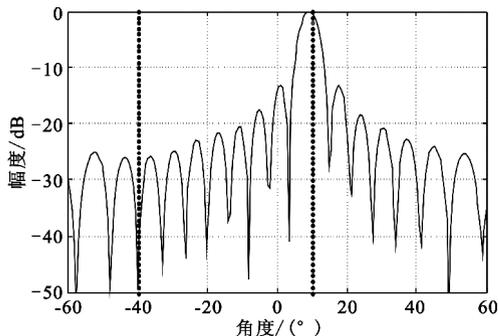


图7 波束指向图
Fig. 7 Beam pointing diagram

在实际卫星通信中,期望用户位置与用户的真实位置总是有一定的角度偏差,而盲算法应具备在恶劣条件下实现波束正确指向的能力。图8给出了不同期望用户位置偏差对波束形成的影响,可以看出,不同的角度偏差经过迭代后波束指向位置在用户实际位置处的幅度几乎一致,表明即使期望用户位置与用户真实位置之间的角度偏差到 90°,仍然可以实现合成波束的正确指向。

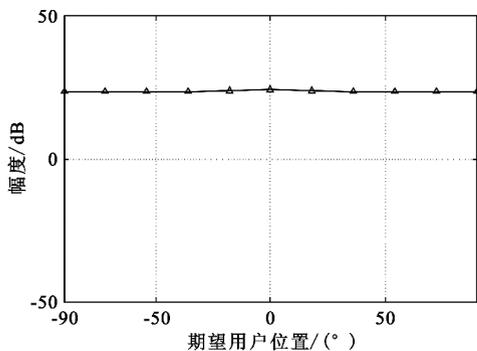


图8 期望用户位置偏差对自适应波束形成的影响
Fig. 8 The results of DOA error effect

4.2 接收机性能测试

在样机测试中,利用 VxWorks 设计了信号产生单元,用来产生带有一定波程差和加性高斯白噪声的扩频信号,信号的信噪比可调节;接收信号天线单元个数设计为 40 个,调制方式为 BPSK,采用的扩频比为 1 023。计算单通道和合成通道的解扩解调后数据信噪比结果如图 9 所示,根据测试条件得到系统增益理论值=扩频增益理论值+阵列天线合成增益理论值 = $10 \times \lg(1023) + 10 \times \lg(40) = 30.1 \text{ dB} +$

$16 \text{ dB} = 46.1 \text{ dB}$ 。

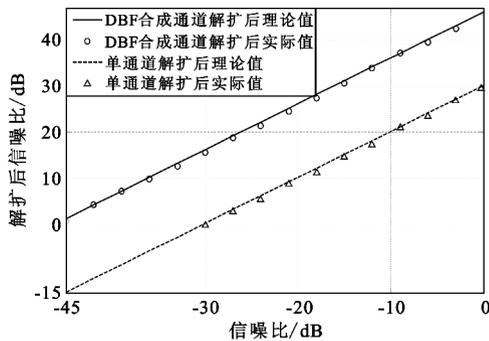


图9 单通道与合成通道解扩后 SNR
Fig. 9 SNR after single channel signal de-spreading and DBF signal de-spreading

由图 9 可观察到,使用本文 FPGA 架构实现的结果与理论值相差较小。当接收信噪比高于 -30 dB 时,由于扩频存在扩频增益,单通道即可完成 PN 码捕获;但当接收信噪比低于 -30 dB 时,单通道已经无法正常工作,而 DBF 合成可以在信噪比低至 -45 dB 仍然可以实现 PN 码捕获。图 10 是在不同信干噪比(SINR)前提下数字接收机对移动用户跟踪下的 BER 分析,可以看出,在不考虑编码的情况下,对用户的跟踪效果很好,抗干扰性能较好,通信可靠性得到了根本保障。

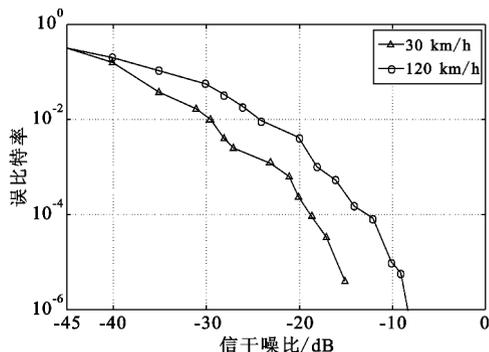


图10 不同速率移动用户自适应跟踪 BER 性能比较
Fig. 10 Adaptive tracking performance of different speed users

5 结束语

本文主要针对阵列天线卫星通信的工作特性,提出了数字波束形成与扩频相结合的数字接收机模式,详细阐述了数字波束形成模块的实现方法,以及其解扩模块中的码捕获部分的 FPGA 设计,解决了阵列天线卫星通信的抗干扰问题,以及在超低信噪

比下可靠性传输的问题,且该接收机方案可以实现对移动用户的实时跟踪,达到了较好的指标,对基于阵列天线的卫星移动通信系统具有很好的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 张小飞,汪飞,徐大专. 阵列信号处理的理论和应用 [M]. 北京:国防工业出版社,2010:1-34.
ZHANG Xiao-fei, WANG Fei, XU Da-zhuan. Theory and application of array signal processing [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010:1-34. (in Chinese)
- [2] 张旭,吴潜. 扩频测控系统的抗干扰能力分析[J]. 电讯技术,2011,51(5):23-27.
ZHANG Xu, WU Qian. Analysis of Anti-jamming Capacity for Direct Spread Spectrum TT&C Systems [J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51 (5) : 23 - 27. (in Chinese)
- [3] Tripathi B S, Kapoor M. Review on DSSS- CDMA transmitter and receiver for AD HOC network using VHDL implementation [J]. International Journal of Advances in Engineering & Technology, 2013, 5(2):274-279.
- [4] 金荣洪,耿军平,范瑜. 无线通信中的智能天线 [M]. 北京:北京邮电大学出版社,2006:150-194.
JIN Rong-hong, GENG Jun-ping, FAN Yu. Smart antennas for wireless communication [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2006: 150-194. (in Chinese)
- [5] 徐小权. 基于 VxWorks 实时多任务的信号处理软件设计 [J]. 电脑知识与技术, 2013, 9(17):4009-4012.
XU Xiao-quan. Design of signal process software based on real-time multitask VxWorks OS [J]. Computer Knowledge and Technology, 2013, 9 (17) : 4009 - 4012. (in Chinese)

- [6] 张芳,熊东,刘晓明,等. 基于 DMF 和多码元累加判决的扩频捕获方法 [J]. 世界科技与发展, 2010, 32(3): 282-284.
ZHANG Fang, XIONG Dong, LIU Xiao-ming, et al. Acquisition Method of Spread spectrum code based on DMF and Multi-symbol accumulation cell [J]. World Sci - Tech R&D, 2012, 32(3):282-284. (in Chinese)
- [7] Popper C, Strasser M, Capkun S. Anti-Jamming broadcast communication using uncoordinated spread spectrum techniques [J]. IEEE Journal on Selected Areas in communications, 2010, 28(5):703-715.
- [8] Bergamo M A. Array Antenna System and Spread Spectrum Beamformer Method; US, Patent Application No. 200901003593 [P]. 2009.
- [9] Ivashina M V, Iupikov O, Maaskant R, et al. An optimal beamforming strategy for wide-field surveys with phased-array-fed reflector antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(6):1864-1875.

作者简介:



刘汉超(1988—),男,吉林榆树人,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为阵列信号处理;

LIU Han-chao was born in Yushu, Jilin Province, in 1988. He is now an assistant engineer and also a graduate student. His research concerns array signal processing.

Email:liuhc1988@hotmail.com

梁昊(1970—),男,黑龙江齐齐哈尔人,副教授,主要研究方向为核探测与核电子学、信号处理等。

LIANG Hao was born in Qiqihaer, Heilongjiang Province, in 1970. He is now an associate professor. His research concerns nuclear detection and nuclear electronics, signal processing.