

基于接收波束成形的自动识别系统的同信道干扰抑制和解调*

丁冬冬 束锋 钱振宇 王建新 盛卫星 陆锦辉

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京, 210094)

摘要: 自动识别系统卫星接收机可接收来自多个同频段蜂窝信号, 不可避免地会产生同信道的信号干扰, 抑制此同信道干扰是自动识别系统的最具挑战性问题之一。为了解决此问题, 提出波达角估计、波束成形加解调的简单串行接收机结构。此结构首先采用多信号分类(Multiple signal classification, MUSIC)和Capon等算法估计出目标信号和干扰信号的波达方向角, 然后利用最小方差无失真响应(Minimum variance distortionless response, MVDR)、匹配滤波(Matched filter, MF)和最小均方误差(Minimum mean square error, MMSE)等波束成形方法将阵列方向对准目标信号入射方向抑制干扰信号, 最后采用二比特差分解调算法检测有用信号。仿真结果表明: 本文提出的结构同单接收天线相比, 多天线波束成形显著地抑制了同信道干扰, 极大地改善了高斯滤波最小频移键控(Gaussian-filtered minimum shift keying, GMSK)信号解调的误比特率性能。

关键词: 自动识别系统; 同信道干扰; 波束成形

中图分类号: TN297+.23 **文献标志码:** A

Received Beamforming-Based Interference Suppression and Demodulation for AIS with Co-Channel Interference

Ding Dongdong, Shu Feng, Qian Zhenyu, Wang Jianxin, Sheng Weixing, Lu Jinhui

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094, China)

Abstract: Automatic identification system (AIS) satellite receiver can receive signals from different cells with the same frequency band, and these signals form co-channel interference (CCI). Suppressing CCI is one of the most challenging issues of the AIS system. A simple serial receiver structure consisting of a direction of arrival (DOA) estimator, a beamformer and a demodulator is proposed. In this structure, incident angles of all desired and interference signals estimated by multiple signal classification (MUSIC) and Capon are given. Then minimum variance distortionless response (MVDR), minimum mean square error (MMSE) and matched filter (MF) beamforming algorithms are employed to make the steering vector align with the incident direction of the desired signal to suppress the undesired interference signals. Finally, a two-bit differential demodulation algorithm is applied to detect the useful signal. The simulation results show that the proposed structure, compared with the single receiving antenna, significantly suppresses CCI and notably improves the bit error rate (BER) performance of Gaussian-filtered minimum shift keying (GMSK) by using multiple antenna beamforming.

Key words: automatic identification system (AIS); co-channel interference (CCI); beamforming

* 基金项目: 国家自然科学基金(61271230)资助项目; 东南大学移动通信国家重点实验室开放课题(2013D02)资助项目。
收稿日期: 2013-12-10; 修订日期: 2014-05-05

引 言

自动识别系统(Automatic identification system, AIS)^[1]由岸基(基站)设施和船载设备共同组成,是一种新型的集网络技术、现代通讯技术、计算机技术和电子信息显示技术为一体的数字助航系统和设备,是一种工作在 VHF 频段采用自组织时分多址(Self-organized time division multiple access, SOTDMA)现代通信技术的广播式自动报告系统。目前 AIS 系统已广泛应用于全球各国海事交通,是国内外研究的热点,特别是在实现船舶交通管理系统的船-岸、船-船间的通信及辅助导航,避免船舶间的碰撞,提高航行的安全等领域有着越来越多的应用^[2]。然而 AIS 系统也有自身的缺点,由于受到传输路径的影响,其通信距离仅为视距通信,这极大地限制了其有效覆盖面积,影响了 AIS 系统效能的发挥,特别是在远程船舶通信领域。目前已有各种技术手段^[3-6]用于扩展 AIS 的应用范围,其中星载 AIS 利用卫星对 AIS 信号进行大范围探测,使得大范围海事监测成为可能,因此越来越成为国内外研究的热点。文献[7-9]开展了星载 AIS 论证、设计及应用研究,主要内容包括可行性分析、仿真评估、卫星搭载 AIS 接收机试验及最终的商业化产品实现等。

由于卫星可见大量的 SOTDMA 小区,自组织结构会丢失,同一时隙可能接收到多个船舶的 AIS 消息,某些船舶就无法检测。因此如何减少不同 SOTDMA 小区的 AIS 信号之间的碰撞或者干扰消除成为星载 AIS 面临的主要技术挑战。为了解决这一难题,国外学者提出了各种技术手段,主要技术手段包括:接收机天线技术^[10-11]和新型接收机技术^[12-13]等技术。文献[10]指出采用适当波束宽度的接收天线能够降低覆盖面积,进而减少和其他船舶 AIS 信号发生碰撞的概率,以提高系统性能。文献[11]通过对可能采用星载接收机天线进行了分析,指出利用交叉偶极天线的方向性或极化对消方法来减少消息碰撞的可能。文献[13]建议星载 AIS 使用普通的 AIS 接收设备,采用二比特差分高斯滤波最小频移键控(Gaussian-filtered minimum shift keying, GMSK)解调的方法。该设备简单,对载波相位误差和解调信号不同的 BT 值不敏感。然而,该解调策略的 BER 性能对同频干扰较为敏感,实际应用效果并不令人满意。文献[14]提出了一种优化最大似然检测接收机,比普通的二比特检测能够降低 2 个数量级的 BER。本文提出一种基于接收端波束成形技术的新型接收机结构,再采用 2 比特差分 GMSK 解调的方法。与没有采用波束成形技术的文献[13]相比,本文提出的新型接收机结构显著降低了 BER,系统性能得到了极大的提升。

1 系统模型

本文以一颗低轨道卫星、 P 只船舶的 AIS 系统为例,在卫星的接收机上安置由 M 个各向同性辐射天线阵元构成的等距线阵,如图 1 所示,阵元间距为 d 。本文不考虑载波仅研究基带信号接收情况。

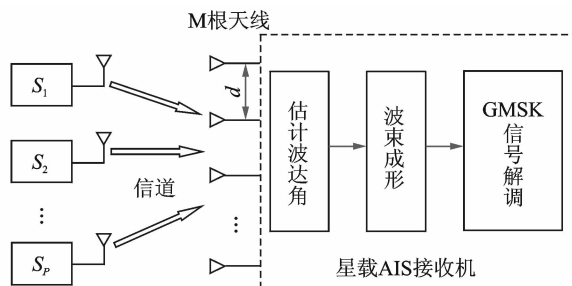


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

船舶 S_1, S_2, \dots, S_P 分别发送二进制 AIS 信号 $I_{in} \in \{\pm 1\}$ ($i=1, 2, \dots, P$), 经过高斯最小频移键控 (GMSK) 调制, 变为基带 GMSK 信号 $s_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, P$) 为

$$s_i(t) = \exp(j\varphi_i(t)) \quad (1)$$

式中 $\varphi_i(t)$ 为 GMSK 相位函数, 可表示为

$$\begin{aligned} \varphi_i(t) = \varphi_{i0} + \pi h \left(\sum_{n=-\infty}^{N-L} I_{in} \int_0^{t-nT} g(y-LT/2) dy + \sum_{n=N-L+1}^N I_{in} \int_0^{t-nT} g(y-LT/2) dy \right) = \\ \varphi_{i0} + \pi h \left(\sum_{n=-\infty}^{N-L} I_{in} + \sum_{n=N-L+1}^N I_{in} \int_0^{t-nT} g(y-LT/2) dy \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: φ_{i0} 为载波相位, $h=0.5$ 为调制指数, $g(\cdot)$ 为 GMSK 脉冲函数。参考文献[15], B 表示高斯脉冲的 -3 dB 带宽, $g(\cdot)$ 定义为

$$g(x) = \frac{1}{T} \left[Q \left[2\pi B \frac{x - \frac{T}{2}}{\sqrt{\ln 2}} \right] - Q \left[2\pi B \frac{x + \frac{T}{2}}{\sqrt{\ln 2}} \right] \right] \quad (3)$$

通常将 g 在 $|x| = \frac{LT}{2}$ 处截断, T 是一个比特周期, L 是正整数, L 和 B 取值足够大, 截断误差就可以忽略不计。AIS 信号传输速率为 9 600 bit/s, 所以要求 $T=1/9\ 600$ s。

基带 GMSK 信号 $s_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, P$) 在 kT 时刻采样, $s_i(t) = s_i(kT) = s_i(k)$, 用 P 维向量 $\mathbf{s}(k)$ 表示 P 路 GMSK 信号, $\mathbf{s}(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_P(k)]^T$ 。经过加性高斯白噪声信道, P 路 GMSK 信号以波达角 θ_i ($i=1, 2, \dots, P$) 到达卫星接收机的天线阵列, 则天线阵列接收到的 M 维信号向量 $\mathbf{x}(k)$ 为

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}\mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{n}(k)$ 表示零均值复高斯随机噪声, \mathbf{A} 表示 $M \times P$ 维的天线阵列方向矩阵。用 Δ 表示阵元间距对载波波长归一化后的系数, \mathbf{A} 满足

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_P)] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{j2\pi\Delta\sin\theta_1} & e^{j2\pi\Delta\sin\theta_2} & \dots & e^{j2\pi\Delta\sin\theta_P} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ e^{j2\pi(M-1)\Delta\sin\theta_1} & e^{j2\pi(M-1)\Delta\sin\theta_2} & \dots & e^{j2\pi(M-1)\Delta\sin\theta_P} \end{bmatrix} \quad (5)$$

天线阵列接收到信号 $\mathbf{x}(k)$ 后, 先估计出各路信号到达天线阵列的波达方向角。本文假设已经准确估计出所有波达角的实际值, 再应用波束成形技术计算出 $M \times P$ 维权重矩阵 $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_P]$ ($\mathbf{w}_i \in \mathbb{C}^M$)。对接收信号向量 $\mathbf{x}(k)$ 在各阵元上的分量加权求和, 增加目标船舶方向的天线增益, 而同时使干扰船舶方向的增益减小。 P 维阵列输出信号向量 $\mathbf{y}(k) = [y_1(k), y_2(k), \dots, y_P(k)]^T$ 为

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{W}^H \mathbf{x}(k) \quad (6)$$

经过波束成形后, $\mathbf{y}(k)$ 恢复了发送的 GMSK 信号 $\mathbf{s}(k)$ 。对这 GMSK 信号采用二比特差分 GMSK 解调的方法检测出船舶发送的二进制 AIS 信号。

2 波束成形算法

假设船舶 S_j 为目标船舶, $I_{in} \in \{\pm 1\}$ 为目标船舶 S_j 发送的第 n 个 AIS 信号。结合式(1)和式(3), 波束成形后, 目标船舶发送的 GMSK 信号的估计值为 $\mathbf{y}_j(k) = \mathbf{w}_j^H \mathbf{x}(k) = \mathbf{w}_j^H (\mathbf{A}\mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k))$ 。下面所有波束成形算法均基于以下假设, 即已知多个同频段小区船舶发射信号入射卫星接收天线阵列的方向。在实际系统中, 这些方向可通过 Capon 算法^[16]和 MUSIC 算法^[16]估计, 估计的方向和实际方向应该存在误差。由于篇幅限制, 本文不讨论 DOA 估计和误差影响问题。

2.1 MVDR 波束成形算法

最小方差无失真响应 (Minimum variance distortionless response, MVDR) 准则^[16]是在已估计出目标

船舶发送的 GMSK 信号来向的情况下,约束天线阵在目标信号方向上的响应为 1,使天线阵输出的信号功率最小,用一个优化问题表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_{j,\text{MVDR}} = \underset{\mathbf{w}_j}{\operatorname{argmin}} E [| \mathbf{w}_j^H (\mathbf{A}\mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k)) |^2] = \underset{\mathbf{w}_j}{\operatorname{argmin}} \mathbf{w}_j^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{w}_j \\ \text{s. t } \mathbf{w}_j^H \cdot \mathbf{A} = \mathbf{e}_j^T \end{aligned} \quad (7)$$

可求得这个优化问题的解为

$$\mathbf{W}_{\text{MVDR}}^H = (\mathbf{A}^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \quad (8)$$

式中 $\mathbf{e}_j \in \{0,1\}^P$ 是第 j 行为 1,其余行为 0 的 P 列向量。 $\mathbf{R}_{xx} = E[\mathbf{x}(k)\mathbf{x}^H(k)]$ 是阵列输入信号 $\mathbf{x}(k)$ 的协方差矩阵。

2.2 MMSE 波束成形算法

目标船舶发送的 GMSK 信号估计值 $\mathbf{y}_j(k)$ 与实际值 $\mathbf{s}_j(k)$ 的均方误差表示为

$$E [| e_j(k) |^2] = E [(\mathbf{s}_j(k) - \mathbf{w}_j^H \mathbf{x}(k)) (\mathbf{s}_j^*(k) - \mathbf{x}^H(k) \mathbf{w}_j)] = J(\mathbf{w}_j) \quad (9)$$

为使均方误差最小,求代价函数 $J(\mathbf{w}_j)$ 对 \mathbf{w}_j^* 的梯度并令其等于零,可求得最小均方误差 (Minimum mean square error, MMSE) 准则^[17] 下的权重向量矩阵为

$$\mathbf{W}_{\text{MMSE}}^H = \mathbf{R}_{ss} \mathbf{A}^H (\mathbf{A} \mathbf{R}_{ss} \mathbf{A}^H + \mathbf{R}_{nn})^{-1} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{R}_{ss} = E[\mathbf{s}(k)\mathbf{s}^H(k)]$ 是 P 个实际 GMSK 信号的信号向量 $\mathbf{s}(k)$ 的协方差矩阵, $\mathbf{R}_{nn} = E[\mathbf{n}(k)\mathbf{n}^H(k)]$ 是噪声协方差矩阵, $\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{A} \mathbf{R}_{ss} \mathbf{A}^H + \mathbf{R}_{nn}$ 。

2.3 MF 波束成形算法

估计出的目标船舶发送的 GMSK 信号与噪声信号的信噪比为

$$\text{SNR}_j = \frac{\mathbf{w}_j^H \mathbf{a}(\theta_j) \mathbf{a}^H(\theta_j) \mathbf{w}_j E [| s_j |^2]}{\mathbf{w}_j^H \mathbf{R}_{nn} \mathbf{w}_j} \quad (11)$$

根据匹配滤波思想,使波束成形器在信噪比最大时估计出目标信号,转换成优化问题为

$$\mathbf{w}_{j,\text{MF}} = \underset{\mathbf{w}_j}{\operatorname{argmax}} \text{SNR}_j \quad (12)$$

求解这个优化问题,可得 MF 准则^[18] 下的权重矩阵为

$$\mathbf{W}_{\text{MF}}^H = \mathbf{A}^H \quad (13)$$

3 二比特差分 GMSK 解调原理

文献[19]给出了 25 种 GMSK 非相干解调方法,但是二比特差分解调的接收设备简单,对载波相位误差和解调信号不同的 BT 值不敏感,所以本文提出的接收机也采用二比特差分解调。

估计出的目标 GMSK 信号 $y_j(t)$ 经过二比特差分,输出

$$D_j(t) = \operatorname{Re} [y_j(t) y_j(t-2T)^*] \quad (14)$$

如果准确估计出目标 GMSK 信号,即 $y_j(t) = s_j(t) = \exp(j\varphi_j(t))$, 这样 $D_j(t)$ 为

$$D_j(t) = \operatorname{Re} [s_j(t) s_j^*(t-2T)] = \operatorname{Re} \{ \exp [j(\varphi_j(t) - \varphi_j(t-2T))] \} \quad (15)$$

假设 $\Delta\varphi_j(2T) = \varphi_j(t) - \varphi_j(t-2T)$, 则检测出目标 AIS 信号为

$$I_{jn} = \operatorname{sign} [\cos(\Delta\varphi_j(2T))] \quad (16)$$

4 仿真结果

船舶数目 $P=2$, 船舶 S_1 发送的信号的波达角 $\theta_1 = -20^\circ$, 船舶 S_2 发送的信号的波达角 $\theta_2 = 0^\circ$ 。假设 S_1 为目标船舶, AIS 信号 8 倍采样。GMSK 调制参数: $L=3, BT=0.4$ 。每次随机产生 1 000 个比特对, 仿真计算平均误比特率。

图2中给出了高斯白噪声环境下文献[13]中的单根天线接收机与MVDR, MMSE, MF 3种波束成形($M=8$)接收机的误比特率随信噪比变化曲线。可以看出,在没有干扰只有目标AIS信号时,相比较文献[13]中的单根天线接收机,本文提出的3种波束成形接收机的BER都比普通接收机降低2个数量级。

图3给出了信干比SIR=5 dB干扰环境下文献[13]中的单根天线接收机与MVDR, MMSE, MF 3种波束成形($M=8$)接收机的误比特率随信噪比变化曲线。由该图可知:本文提出的这3种波束成形接收机都有效对抗了干扰,随信噪比增大BER降低越明显,当SNR增大到15 dB时,MF波束成形接收机比单根天线接收机的BER降低了3个数量级,而MVDR和MMSE则更加明显,比单根天线接收机的BER降低了5个数量级。

图4给出了信干比SIR=5 dB干扰环境下,信噪比SNR=-5, 0和5 dB下MVDR波束成形接收机的误比特率与天线数的关系。可以看出,在信噪比一定时,接收端天线数目越多, MVDR波束成形接收机的BER降低越明显。MMSE, MF波束成形接收机的BER与天线数的关系与MVDR相同。

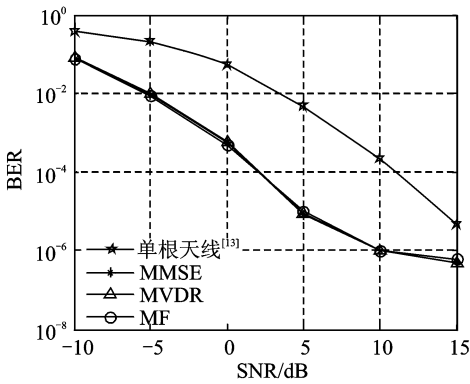


图2 高斯白噪声环境下,3种波束成形接收机与单根天线接收机的误比特率性能对比

Fig. 2 Comparison of BER among three beamforming receiver and the single-antenna receiver under white-Gaussian-noise circumstance

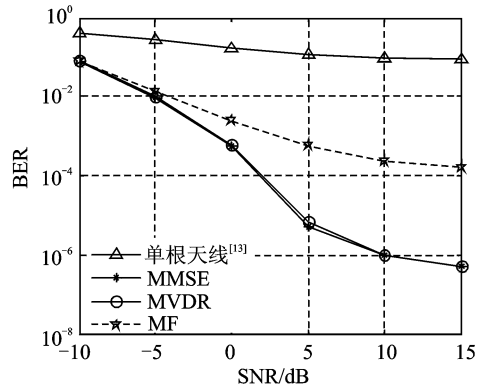


图3 信干比为5 dB干扰环境下,3种波束成形接收机与单根天线接收机的误比特率性能对比

Fig. 3 Comparison of BER among three beamforming receiver and the single-antenna receiver with 5 dB SIR

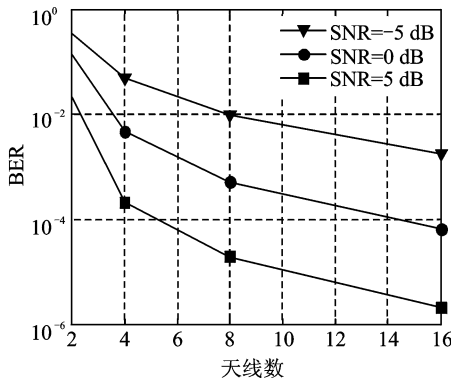


图4 信干比为5 dB干扰环境下,信噪比为-5, 0和5 dB下MVDR波束成形接收机的误比特率与天线数的关系
Fig. 4 Relationship of BER of MVDR receiver and the number of antennas at 5 dB SIR with SNR being -5, 0 and 5 dB respectively

表1给出了MVDR,MMSE,MF 3种波束成形算法的计算复杂度。 K 表示采样点数。由表1可以看出:忽略 P^3 项,MVDR与MMSE的复杂度一样,MF的复杂度最低。

表1 最小方差无失真响应、最小均方误差、匹配滤波波束成形算法复杂度

算法	计算复杂度
MVDR	$KPM^2 + \frac{4}{3}M^3 + 2PM^2 + 2P^2M + \frac{4}{3}P^3$
MMSE	$KPM^2 + \frac{4}{3}M^3 + 2PM^2 + 2P^2M$
MF	KPM^2

5 结束语

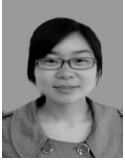
为了解决AIS系统同信道干扰这一难题,本文提出MVDR,MMSE,MF等波束成形加二比特差分解调的简单串行接收机结构。由仿真结果可以看出,加入波束成形后的接收机性能明显优于以前的普通单天线AIS接收机,尤其是MVDR和MMSE这两种波束成形方法对接收性能提升显著,例如SIR=5 dB干扰环境下BER与高斯噪声环境下BER一样,SNR为5 dB时BER达到了 10^{-6} 数量级。该接收机有效地实现了目标AIS信号与干扰信号的分离,可用于改善普通单天线接收机对干扰敏感的缺陷。

参考文献:

- [1] ITU-R M 1371-2. Technical characteristics for universal shipborne identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile band[S]. 2001:1-20.
- [2] Eriksen T, Høye G, Narheim B, et al. Maritime traffic monitoring using a space-based AIS receiver[J]. Acta Astronautica, 2006, 58(10):537-549.
- [3] Yang Menghui, Zou Yongzhong, Fang Li. Collision and detection performance with three overlap signal collisions in space-based AIS reception [C]//11th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom). Liverpool: IEEE, 2012: 1641-1648.
- [4] Graziano M D, Marco D, Razzano E. Constellation analysis of an integrated AIS/remote sensing spaceborne system for ship detection [J]. Advances in Space Research, 2012, 50(3):351-362.
- [5] 丁颖婷,仰枫帆. 新型卫星导航系统在半盲信道中的抗干扰研究[J]. 数据采集与处理, 2012,27(5):595-601. Ding Yingting, Yang Fengfan. Research on the anti-interference performance of the novel satellite navigation system in the half-blind channel[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012, 27(5):595-601.
- [6] Tavener S, Cooper T. Automatic identification system: AIS-A reception of AIS-B,2008 study[R]. Australia: 2008.
- [7] Scorzoloni A, Razzano E. European enhanced space-based AIS system study[C]//the 11th Signal Processing for Space Communications(SPSC) Workshop. Cagliari:IEEE, 2010 :9-16.
- [8] Cervera M, Ginesi A, Eckstein K. Satellite-based vessel automatic identification system: A feasibility and performance analysis[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2011, 29(2):117-142.
- [9] Dembovskis A. Testbed for performance evaluation of SAT-AIS receivers [C]//Advanced satellite multimedia systems conference (ASMS) and the 12th signal processing for space communications workshop (SPSC). Baiona:IEEE,2012:253-257.
- [10] ITU. Satellite detection of automatic identification system messages[C]//Radio Communication Study Groups. Australia: [s. n.],2006.
- [11] Dahl O F H. Space-based AIS receiver for maritime traffic monitoring using interference cancellation [D]. Norway:Norwegian University of Science and Technology, 2006.
- [12] Cervera M A, Ginesi A. On the performance analysis of a satellite-based AIS system [C]//10th International Workshop on Signal Processing for Space Communications. Greece: IEEE, 2008:1-8.
- [13] Hicks J E, Clark J S, Stocker J, et al. AIS/GMSK receiver on FPGA platform for satellite application [C]//Proc SPIE 5819, Digital Wireless Communications VII and Space Communication Technologies. USA:SPIE, 2005:403-414.
- [14] Burzigotti P, Ginesi A, Colavolpe G. Advanced receiver design for satellite-based automatic identification system signal detection[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2012, 30(2):52-63.
- [15] Proakis J. Digital communications [M]. 4th Ed. N Y: McGraw-Hill, 2001.

- [16] Cox H, Zeskind R, Owen M. Robust adaptive beamforming[J]. *IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing*, 1987, 35 (10):1365-1376.
- [17] Godara L. Application of antenna arrays to mobile communications, Part II: Beam-forming and direction-of-arrival considerations [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(8): 1195-1234.
- [18] Gross F. Smart antennas for wireless communications [M]. NY: McGraw-Hill, 2005:1-271.
- [19] Laster J D. Robust GMSK demodulation using demodulator diversity and BER estimation [D]. USA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.

作者简介:



丁冬冬(1988-),女,硕士研究生,研究方向:卫星定位与组合导航, E-mail: di-ong88208@sina.com。



束锋(1973-),男,研究员,博士生导师,研究方向:卫星定位与组合导航、无线通信、雷达信号处理等, E-mail: shufeng@njust.edu.cn。



钱振宇(1990-),男,硕士研究生,研究方向: MIMO 双向中继, E-mail: chaseq@163.com。



王建新(1963-),男,教授,博士生导师,研究方向:数字通信系统设计、通信信号侦测等, E-mail: wangjxin@mail.njust.edu.cn。



盛卫星(1966-),男,教授,博士生导师,研究方向:数字波束形成与智能天线、自适应阵列信号处理等, E-mail: shengwx@mail.njust.edu.cn。



陆锦辉(1962-),男,教授,研究方向:雷达系统无线通信等, E-mail: ljh_412@sina.com。

