

星载 AIS 检测概率建模与仿真分析*

程云,陈利虎,陈小前

(国防科技大学 航天科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要:针对现有星载 AIS 检测概率低的问题,对星载 AIS 接收信号冲突和检测概率进行了研究和论证,并对影响检测概率的诸多因素进行了分析。分析了星载 AIS 与地面 AIS 的差异性,指出了星载 AIS 面临的新挑战。重点对星载 AIS 信号多网冲突问题进行了研究,建立了一种基于船舶分布密度函数的星载 AIS 检测概率模型。通过分析时隙冲突、船舶动态、轨道高度、天线类型和 B 类 AIS 船舶等因素对系统检测概率的影响,为工程设计和性能评估提供了一定参考依据。

关键词:星载 AIS;检测概率;多网冲突;船舶分布

中图分类号:TN911.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)03-0051-07

Modeling and simulation analysis of detection probability for space-based AIS

CHENG Yun, CHEN Lihu, CHEN Xiaolian

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at solving the low detection probability problem of space-based AIS, the received signal collision phenomenon and ship detection probability model were studied. The difference between Space-based AIS and traditional terrestrial AIS was compared and analyzed. And the new technical challenge of space-based AIS was pointed out. The problem of AIS signals collision from multi SOTDMA cells was studied in detail. The detection probability model based on ship density function was established theoretically. The effects of slot collision, orbit height, antenna swath and Class B ships on detection probability were estimated quantitatively by simulations, which can provide theoretical reference for designing and evaluating the space-based AIS in the future.

Key words: space-based AIS; ship detection probability; multi signal collision; ship distribution

船舶自动识别系统 (Automatic Identification System, AIS) 是指在甚高频海上移动频段采用自组织时分多址 (Self Organized Time Division Multiple Access, SOTDMA) 接入方式自动广播和接收船舶动态、静态等信息进行船只识别、监视和通信的系统^[1]。AIS 系统最初是针对船基及陆基平台设计的甚高频 (Very High Frequency, VHF) 无线电通信系统, 因而其覆盖范围和时效性受到较大限制, 无法对远离海岸线的船舶进行探测和跟踪, 实现大范围、持续监视敏感地区。

2003 年, Wahl 和 Høye 首次提出利用低轨小卫星解决大范围海事监测的设想, 正式提出星载 AIS 的概念^[2]。通过追踪国内外有关星载 AIS 最新的研究成果和技术文献, 本文对星载 AIS 系统的检测概率进行了深入研究。针对船只检测概率低这个普遍问题, 从分析星载 AIS 与传统陆基

(岸基) AIS 的差异性出发, 重点对 AIS 信号多网冲突问题进行了研究, 建立了系统的观测模型和基于船只分布密度函数的检测概率模型, 并修正了模型中船只的观测时间。最后, 仿真分析了影响星载 AIS 检测概率的各种因素, 并根据仿真结果提出了相应改进措施。

1 星载 AIS 系统

1.1 AIS 系统特点

AIS 技术标准规定: 将每分钟划分为 2250 个时隙。每个时隙可发射一条不长于 256bits 的信息, 长于 256bits 的信息需占用多个时隙 (但最多不超过 5 个)。每条船舶会通过询问 (自动) 选择一个与其他船不发生冲突的时间段和对应的时间段来发布本船的信息。在统一的 VHF 频道上, 每

* 收稿日期: 2013-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61302092)

作者简介: 程云 (1987—), 男, 湖北随州人, 博士研究生, E-mail: chengyun0507@gmail.com;

陈小前 (通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: chenxiaolian@nudt.edu.cn

条 AIS 信息的帧起始和结束都严格与协调世界时 (Coordinated Universal Time, UTC) 同步, AIS 自组织网络范围内任何船舶都能自行互不干扰地发送报告和接收全部船舶 (岸站) 的报告^[1]。AIS 系统有两个工作频点: CH 87B (161. 975MHz) 和 CH 88B (162. 025MHz), 每分钟有 4500 个时隙可以用来收发 AIS 信息。船载 AIS 包括 A 类 AIS 发射机、B 类 AIS 发射机和 AIS 接收机。B 类 AIS 发射机尚未强制规定必须安装在 A 类 AIS 的船舶上, 有助于提高海上航行的安全。通常 A 类 AIS 的最大发射功率为 12. 5W, 发射周期为 2s ~ 3min, B 类 AIS 的发射功率为 2. 5W, 发射周期为 30s ~ 3min 不等。

在 AIS 系统中, 数据编码采用反向不归零编码, 并采用高斯滤波最小频移键控调制方式来发射信号^[3]。AIS 系统中船舶与船舶之间、船舶与基站之间的通信主要有 22 种数据信息, 报文长度共 256bits, 传输速率为 9600bits/s, 其中数据域长度为 168bits, 缓冲段通常包含 24bits, 缓冲段中的 12bits 用于传输保护, 等效的延迟保护距离为 202nm^[1]。

1.2 星载 AIS 与地面 AIS 系统的差异

星载 AIS 系统是指利用一颗或者多颗低轨卫星搭载 AIS 接收机在轨侦收船舶 AIS 信号的系统。星载 AIS 由传统 AIS 系统发展而来, 具有常规 AIS 系统的基本技术特点, 应用优势明显。与此同时, 它又面临不同于传统 AIS 系统的新挑战, 主要有: AIS 信号多网冲突、多普勒频移、空间衰减和 AIS 接收机差异^[4]。

1) 信号多网冲突

星载 AIS 系统覆盖范围广, 通常包含多个 SOTDMA 子网络, 各 SOTDMA 子网络内信号不会发生冲突, 但各子网络之间是互相独立的。因此, 当船舶超过一定数目时, 由不同 SOTDMA 子网络内船舶发送的 AIS 信号有可能会同时达到 AIS 接收机, 从而产生时隙冲突, 即星载 AIS 信号的多网冲突问题。按照发生信号冲突时隙的不同, 星载 AIS 信号冲突可分为两类^[5]: (a) 不同 SOTDMA 子网络内的船舶在同一时隙发送 AIS 信号, 经过相同的传输距离, 同时达到 AIS 接收机, 发生冲突; (b) 不同 SOTDMA 子网络内的船舶在不同时隙发送 AIS 信号, 经过不同的传输距离, 同时达到 AIS 接收机。AIS 信号冲突的程度与覆盖范围内船舶的数量和船舶的报告周期密切相关。当星载 AIS 覆盖范围较小时, 系统内只存在第一类信号

冲突。以 600km 轨道高度的星载 AIS 为例, 当 AIS 天线幅宽低于 800nm (即临界幅宽) 时, 只能发生第一类信号冲突。当 AIS 天线幅宽大于 800nm 时, 两类 AIS 信号冲突都将存在。

2) 多普勒频移

多普勒频移是由卫星的高速运动特性所引起的。卫星的高速运动可以将星载 AIS 系统覆盖范围内所有的船舶视为静止状态, 且星载 AIS 覆盖范围广, 不同位置船舶发出的 AIS 信号到达卫星后, 其载波频率会发生不同程度的偏移, 即多普勒频移。因此, 多普勒频移的大小主要与卫星速度、载波频率和船舶的位置有关, 其计算公式如下^[5]:

$$\Delta f = f_0 \cdot \frac{V_s \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi}{c} \quad (1)$$

其中, f_0 为 AIS 信号的载波频率, V_s 为卫星速度, θ 、 φ 分别为船舶相对卫星的俯仰角和方位角。

以 600km 轨道高度为例, 采用全向天线的星载 AIS 系统覆盖范围内船舶的多普勒频移变化曲线如图 1 所示。对典型的低轨卫星和采用全向天线的星载 AIS 系统而言, AIS 信号多普勒频移的变化范围为 -3. 8kHz ~ +3. 8kHz。一方面, 它增加了对星载 AIS 接收机带宽的要求; 另一方面, AIS 信号的载波存在差别, 且最大频移差值可达到 7. 6kHz, 对于分离冲突/混叠的 AIS 信号有一定积极辅助作用。

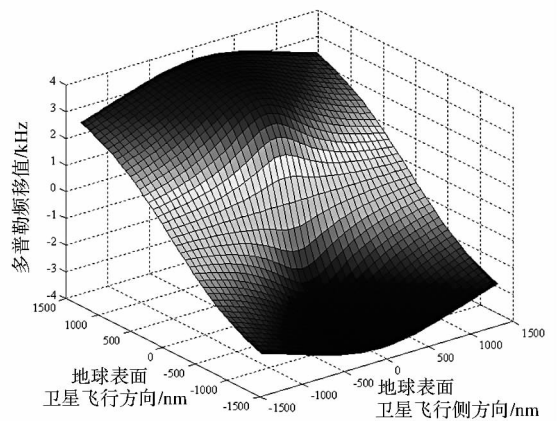


图 1 星载 AIS 系统覆盖范围内多普勒频移分布图

Fig. 1 Doppler shift distribution in the field of view

3) 空间传输衰减

在星载 AIS 星地链路中, 除一般的传输线、射频和滤波器损耗外, AIS 信号还受到大气衰减、多径衰减、自由空间传播损耗和电离层衰减 (法拉第旋转效应) 等因素影响。其中, 大气衰减和多径衰减对 AIS 信号的强度影响不大, 一般为

1~2dB, 法拉第旋转效应导致的极化偏转所带来的信号衰减约为 3dB, 自由空间传播损耗的影响最为明显, 它与传输距离和载波频率密切相关, 大大降低了接收 AIS 信号的信噪比, 从而对星载 AIS 接收机的灵敏度提出了更高要求。

2 信号冲突分析与检测概率建模

目前, 对星载 AIS 系统的建模主要有基于船只均匀分布假设和基于 AIS 信号到达时间服从泊松分布过程两种方法^[6-7], 这两种方法都对问题进行了很大程度的简化, 前者没有考虑船只真实分布, 后者没有考虑不同种类信号冲突的影响程度, 因此并不能充分反映实际情况下星载 AIS 系统的侦测情况。为此, 本节建立以下基于船只分布密度函数的星载 AIS 检测概率模型。

星载 AIS 系统的观测模型如图 2 所示^[8]。图中 A 对应于某个观测区域, (I) 和 (II a)、(II b) 分别表示相应的第一类和第二类冲突区域, ΔR_s 表示时延保护距离, φ 表示观测区域中心与星下点 O 之间的角距。

首先, 定义如下星载 AIS 系统的船只检测概率表达式。

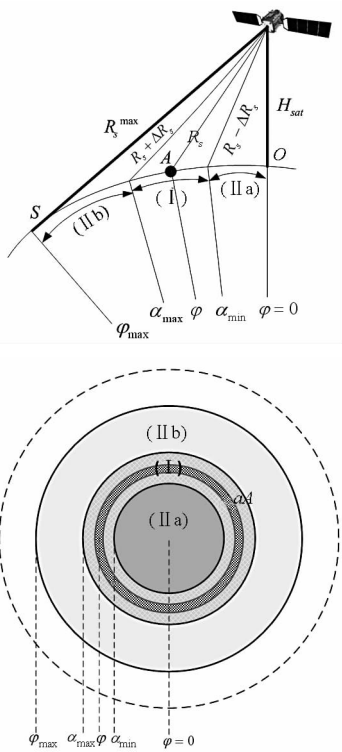


图 2 星载 AIS 系统观测模型示意图

Fig.2 Observation model of space-based AIS

$$\widetilde{P}_{\Delta T} = \frac{\int_0^{\varphi_{\max}} p(\varphi) \cdot N(\varphi) d\varphi}{N_{tot}} \quad (2)$$

其中, φ 定义如图 2 中所示, $p(\varphi)$ 为该区域船舶

在一个信号报告周期 ΔT 内的检测概率, $N(\varphi)$ 为该区域对应的船舶总数量; $\widetilde{P}_{\Delta T}$ 表示观测时间 ΔT 内, 观测区域内某个船舶的平均检测概率。

从而, 在观测时间 T_{obs} 内, 星载 AIS 系统的平均检测概率可表示如下:

$$P = 1 - (1 - \widetilde{P}_{\Delta T})^{\frac{T_{obs}}{\Delta T}} = 1 - \left[1 - \frac{1}{N_{tot}} \int_0^{\varphi_{\max}} p(\varphi) \cdot N(\varphi) d\varphi \right]^{\frac{T_{obs}}{\Delta T}} \quad (3)$$

根据以往 AIS 卫星侦测的结果来看, 海岸线附近的船舶比较密集, 大洋中部较为稀疏, 且船舶都有比较固定的航线。不失一般性, 假定在系统覆盖范围内船舶的分布沿半径方向上服从如下密度函数

$$\rho(x) = \frac{b_0}{1 + \frac{a_0}{r_0} \cdot x} \quad (4)$$

其中, $\rho(x)$ 为覆盖范围内沿半径方向上单位面积内船舶的数量, x 表示距离星下点轨迹的长度, 如图 2 中的 \widehat{OA} ; r_0 为覆盖范围的半径长度; a_0 是表示船舶分布疏密程度的常量; b_0 为常量, 与船舶总数量和 a_0 密切相关。

由于 $r_0 = R \cdot \varphi_{\max}$, $x = R \cdot \varphi$, 故式(4)可进一步转化为

$$\rho(\varphi) = \frac{b_0}{1 + \frac{a_0}{\varphi_{\max}} \cdot \varphi} \quad (5)$$

对应的观测区域 A 的面积

$$dA = s(\varphi) = 2\pi R^2 \sin\varphi \cdot d\varphi \quad (6)$$

系统覆盖范围船舶的总数量

$$N_{tot} = \int_0^{\varphi_{\max}} N_A(\varphi) d\varphi = \int_0^{\varphi_{\max}} \rho(\varphi) \cdot s(\varphi) d\varphi \quad (7)$$

那么, 在一个 AIS 信号报告周期 ΔT 内, 观测区域 A 内船只与区域 (I) 的船只不发生信号冲突的概率可表示为^[6]

$$\begin{aligned} \widetilde{P}_{\Delta T}^I &= 1 - c_1 \cdot \frac{N_I}{N_{I(\max)}} \\ &= 1 - c_1 \cdot \frac{N_I}{37.5 \cdot n_{ch} \cdot M_I \cdot \Delta T} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, N_I 为区域 (I) 中船只数量; M_I 为区域 (I) 中的自组织子网络的数目; c_1 为分布因子, 表征该区域内船舶分布的不均匀程度。

显然, 分布因子 c_1 与所在区域船只密度和区域面积相关, 本文中, 做如下定义:

$$c_1(\varphi) = \sqrt{1 + \frac{\rho_{\max}(\varphi) - \rho_{\min}(\varphi)}{2\rho_{avg}(\varphi)}} \quad (9)$$

其中, $\rho_{\max}(\varphi)$ 、 $\rho_{\min}(\varphi)$ 分别表示环形区域 (I) 中最大船只密度和最小船只密度, $\rho_{\text{avg}}(\varphi) = N_I(\varphi)/S_I(\varphi)$ 表示环形区域 (I) 的平均船只密度, 则 $c_1 = 1$ 表示船只均匀分布。

同理, 在一个 AIS 信号报告周期 ΔT 内, 观测区域 A 内船只与区域 (II) 的船只不发生信号冲突的概率可表示为

$$\begin{aligned} \widetilde{P}_{\Delta T}^{\text{II}} &= 1 - c_2 \cdot k \cdot \frac{N_{\text{II}}}{N_{\text{II}}(\text{max})} \\ &= 1 - c_2 \cdot k \cdot \frac{N_{\text{II}}}{37.5 \cdot n_{\text{ch}} \cdot M_{\text{II}} \cdot \Delta T} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, N_{II} 为区域 (II) 中船只数量, M_{II} 为区域 (II) 中的自组织网络的数目, $k = 2 - \frac{N_{\text{tot}}}{37.5 \cdot n_{\text{ch}} \cdot M \cdot \Delta T}$, 为插入因子^[6]。分布因子 $c_2(\varphi) = c_{2a}(\varphi) \cdot c_{2b}(\varphi)$, $c_{2a}(\varphi)$ 和 $c_{2b}(\varphi)$ 的定义与 $c_1(\varphi)$ 相同。

根据式 (8) ~ (10), 可以得到一个信号报告周期 ΔT 内, 观测区域 A 对应的 φ 处船舶检测概率:

$$\begin{aligned} p(\varphi) &= \widetilde{P}_{\Delta T}^{\text{I}} M_I(\varphi)^{-1} \cdot \widetilde{P}_{\Delta T}^{\text{II}} M_{\text{II}}(\varphi) d\varphi \\ &= \left(1 - c_1(\varphi) \cdot \frac{N_I(\varphi)}{37.5 \cdot n_{\text{ch}} \cdot M_I(\varphi) \cdot \Delta T} \right)^{M_I(\varphi)^{-1}} \\ &\quad \cdot \left(1 - c_2(\varphi) \cdot k \cdot \frac{N_{\text{II}}(\varphi)}{37.5 \cdot n_{\text{ch}} \cdot M_{\text{II}}(\varphi) \cdot \Delta T} \right)^{M_{\text{II}}(\varphi)} \end{aligned} \quad (11)$$

式中,

$$\begin{cases} N_I(\varphi) = \int_{\alpha_{\min}(\varphi)}^{\alpha_{\max}(\varphi)} \rho(\varphi) \cdot s(\varphi) d\varphi \\ N_{\text{II}}(\varphi) = N_{\text{tot}} - \int_{\alpha_{\min}(\varphi)}^{\alpha_{\max}(\varphi)} \rho(\varphi) \cdot s(\varphi) d\varphi \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} M_I(\varphi) = \frac{2\pi R^2}{A_{\text{cell}}} \cdot [\cos(\alpha_{\min}(\varphi)) - \cos(\alpha_{\max}(\varphi))] \\ M_{\text{II}}(\varphi) = \frac{2\pi R^2}{A_{\text{cell}}} \cdot \left\{ (1 - \cos(\varphi_{\max})) - [\cos(\alpha_{\min}(\varphi)) - \cos(\alpha_{\max}(\varphi))] \right\} \end{cases} \quad (13)$$

A_{cell} 表示单个自组织子网络的面积大小。

此外, 以往基于均匀分布假设前提下得到的观测时间也并不准确, 这是因为考虑到天线的波束形状, 系统的实际覆盖范围并不是方形的, 通常应该是圆形的, 如图 3 所示。显然, 位于卫星飞行方向上左右两侧覆盖范围边缘附近的船舶, 其观测时间是最短的且趋于 0, 位于波束中心的船舶的观测时间是最长的^[5]。因此, 必须确定覆盖范围所有船舶的平均等效观测时间以建立较为准确的检测概率模型。

则船舶平均等效观测时间可计算如下:

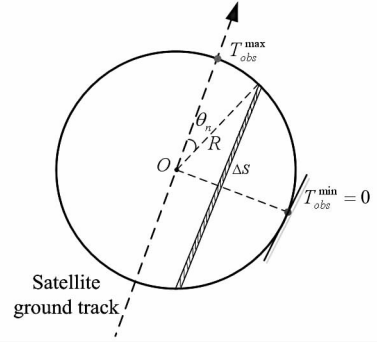


图 3 船舶观测时间分布示意图

Fig. 3 Distributions of ship observation time

$$\begin{aligned} \overline{T_{\text{obs}}} &= \frac{\sum_{n=0}^N T_{\text{obs}}(\theta_n) \cdot \Delta S(\theta_n)}{S_{\text{tot}}} \\ &= \frac{1}{(\pi R^2/2)} \sum_{n=0}^N T_{\text{obs}}^{\text{max}} \cos\theta_n \\ &\quad \cdot 2R \cos\theta_n \cdot R(\sin\theta_{n+1} - \sin\theta_n) \\ &= (4T_{\text{obs}}^{\text{max}}/\pi) \sum_{n=0}^N (\cos\theta_n)^2 (\sin\theta_{n+1} - \sin\theta_n) \end{aligned} \quad (14)$$

式中, $\theta_n = n \cdot \Delta\varphi$, $\Delta\varphi = \frac{(\pi/2)}{N+1}$ 。

因此, 在观测时间 T_{obs} 内, 信号报告周期为 ΔT , 船舶分布服从 $\rho(x)$ 条件下, 星载 AIS 系统覆盖范围内任意船舶的理论检测概率可表示为

$$\begin{aligned} \tilde{P} &= 1 - (1 - \widetilde{P}_{\Delta T}^{\text{obs}})^{\frac{T_{\text{obs}}}{\Delta T}} \\ &= 1 - \left(1 - \frac{1}{N_{\text{tot}}} \int_0^{\varphi_{\text{max}}} p(\varphi) \cdot N(\varphi) d\varphi \right)^{\frac{T_{\text{obs}}}{\Delta T}} \end{aligned} \quad (15)$$

根据式 (15) 可以得到几种典型分布下船舶检测概率。如, 当 $a_0 = -3/4$ 时, 表示覆盖范围内中心船只密度与边缘密度之比为 1:4, 呈现从中心到边缘逐渐增大的趋势; 当 $a_0 = 0$ 时, 表示船只服从均匀分布, 其他依此类推。图 4 给出了 $H_{\text{sat}} = 600\text{km}$ 、 $\Delta T = 10\text{s}$ 情况下, 不同船只分布密度下, 系统覆盖范围内船舶检测概率的对比结果。

从图 4 可以看出: 当船舶数量一定时, 非均匀分布情况下系统的检测概率低于均匀分布情况下的检测概率, 且船舶分布越不均匀, 检测概率越低。此外, 还可以看出, 当船只分布呈现“中间疏、边缘密”状态时, 其检测概率比“中间密、边缘疏”的状态时要高。

3 检测概率影响因素分析

3.1 时隙冲突研究

根据式 (2) 可知, 在一个信号周期 ΔT 内某个

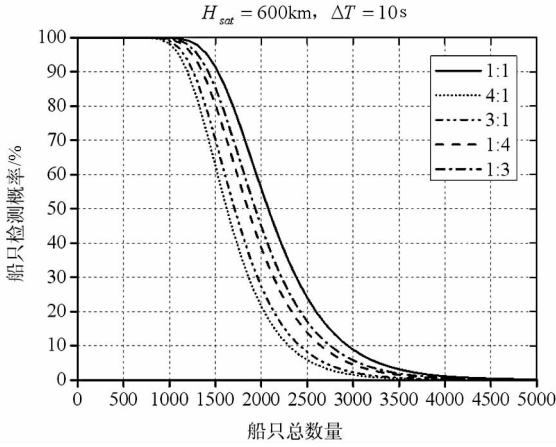


图4 不同船只分布状态的船只检测概率对比图
Fig. 4 Ship detection probability beyond different ship distributions

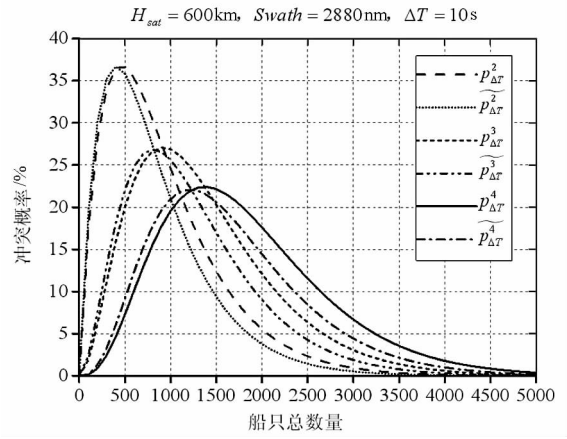


图5 时隙冲突概率对比图
Fig. 5 Comparison of slot collision probabilities

船舶发射的 AIS 信号不受冲突的概率可表示为

$$\begin{aligned} \widetilde{P}_{\Delta T} &= \frac{\int_0^{\varphi_{\max}} p(\varphi) \cdot N(\varphi) d\varphi}{N_{\text{tot}}} \\ &= \frac{1}{N_{\text{tot}}} \int_0^{\varphi_{\max}} (\widetilde{P}_{\Delta T}^I)^{M_I(\varphi)-1} \cdot (\widetilde{P}_{\Delta T}^{II})^{M_{II}(\varphi)} \cdot N(\varphi) d\varphi \end{aligned} \quad (16)$$

而被观测船舶与其他船舶发生时隙冲突的情况可分为:i)与区域(I)的船舶发生冲突;ii)与区域(II)的船舶发生冲突。则发生2个信号冲突的概率可表示如下:

$$\widetilde{P}_{\Delta T}^2 = \widetilde{P}_{\Delta T}^{1,0} + \widetilde{P}_{\Delta T}^{0,1} \quad (17)$$

其中,

$$\begin{aligned} \widetilde{P}_{\Delta T}^{1,0} &= \frac{1}{N_{\text{tot}}} \int_0^{\varphi_{\max}} C_{M_I(\varphi)-1}^1 \cdot (\widetilde{P}_{\Delta T}^I)^{M_I(\varphi)-2} (1 - \widetilde{P}_{\Delta T}^I) \\ &\quad \cdot (\widetilde{P}_{\Delta T}^{II})^{M_{II}(\varphi)} \cdot N(\varphi) d\varphi \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \widetilde{P}_{\Delta T}^{0,1} &= \frac{1}{N_{\text{tot}}} \int_0^{\varphi_{\max}} C_{M_{II}(\varphi)}^1 \cdot (\widetilde{P}_{\Delta T}^I)^{M_I(\varphi)-1} \\ &\quad \cdot (\widetilde{P}_{\Delta T}^{II})^{M_{II}(\varphi)-1} (1 - \widetilde{P}_{\Delta T}^{II}) \cdot N(\varphi) d\varphi \end{aligned} \quad (19)$$

同理,发生3、4个信号冲突概率为

$$\begin{cases} \widetilde{P}_{\Delta T}^3 = \widetilde{P}_{\Delta T}^{2,0} + \widetilde{P}_{\Delta T}^{1,1} + \widetilde{P}_{\Delta T}^{0,2} \\ \widetilde{P}_{\Delta T}^4 = \widetilde{P}_{\Delta T}^{3,0} + \widetilde{P}_{\Delta T}^{2,1} + \widetilde{P}_{\Delta T}^{1,2} + \widetilde{P}_{\Delta T}^{0,3} \end{cases} \quad (20)$$

图5给出了船只均匀分布和非均匀分布下的时隙冲突概率对比结果。其中船舶非均匀分布密度为1:4,以下未特别指明时,均按此计算。

从上图可以看出,均匀与非均匀分布情况下,在一个时隙内,发生2、3、4个信号冲突的概率基本相同且都比较高,且随着船舶总数的增加呈现出先增大后减小趋势。这是因为当船只总数量较多时,每个时隙内冲突信号的数目都会相应增加,

相应地,发生较少(4个以下)信号冲突的概率减小。因此,可以预见,如果采用适当的混合信号分离算法有效地分离2个、3个信号同时冲突的情况,那么系统的检测概率将会有大幅度的提高^[9]。

3.2 船舶动态

从式(11)、(15)可以看出,AIS信号的报告周期直接影响到信号冲突的程度,从而对系统的检测概率产生重要影响。AIS信号的报告周期与船舶的运动状态密切相关,船舶速度越高、运动状态变化越快,信号报告周期就越短。图6仿真了平均报告周期分别为6s、10s、15s时,船舶非均匀分布情况下星载AIS系统的检测概率。

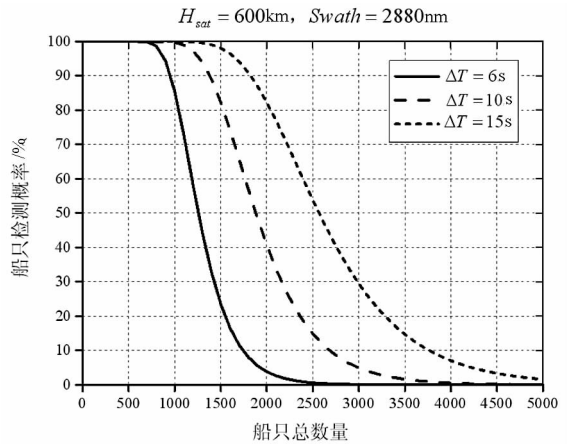


图6 不同信号报告周期下船只检测概率
Fig. 6 Ship detection probability under different report intervals

从图6中可以看出,当船舶超过一定数目(>500)时,随着船舶数目增大,检测概率迅速降低。考虑到星载AIS覆盖范围内船只的观测时间较长,且海上船舶航速较低,因此对于这种远距离传输、接收的AIS信号,可适当延长信号报告周

期,将有助于提高系统的检测概率。

3.3 轨道高度

对星载 AIS 系统而言,当采用全向天线时,不同轨道高度下,系统的覆盖范围各不相同,观测时间 T_{obs} 也不尽相同。轨道越高,覆盖范围越大, T_{obs} 也越大,但覆盖范围内的船舶总数也越多,这在一定程度上又增加了信号冲突的程度。以低轨道 AIS 卫星为例,分别仿真了轨道高度为 400km, 600km, 800km 和 1000km 时,船舶非均匀分布下系统的检测概率,结果如图 7 所示。

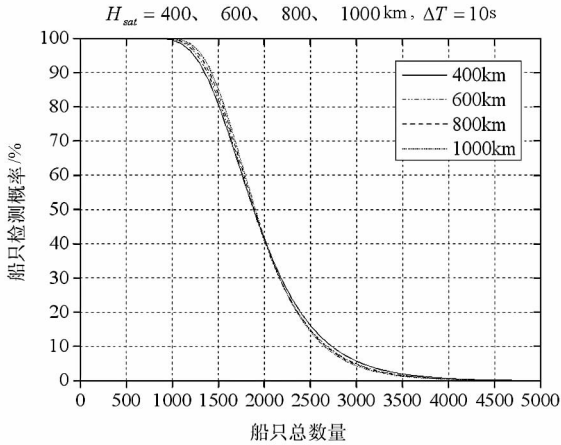


图 7 不同轨道高度下船只检测概率

Fig. 7 Ship detection probability on different orbit height

从上图可以看出,当采用全向天线时,不同轨道高度下,船舶总数相同时,系统的检测概率基本相同。然而,必须注意的是:实际情况下,轨道高度越高,天线幅宽越大、覆盖范围内的船只数量也越多,检测概率必然降低。因此根据上图可以推断:轨道高度越低,覆盖范围内船舶总数量越少,系统检测概率将越高。

3.4 天线类型

在轨道高度一定时,天线类型决定了幅宽大小,并直接影响到覆盖范围的大小。以上讨论都是基于全向天线,然而,采用方向天线以减小覆盖范围大小,可有效减少瞬时观测到船舶的总数量,从而改善 AIS 信号冲突的程度,同时有效观测时间 T_{obs} 也会减小,又会降低系统的检测概率。为此,研究采用不同幅宽的方向天线系统检测概率的变化可为工程设计提供有益参考。如图 8 通过仿真对比了轨道高度为 600km 时,不同天线幅宽下星载 AIS 系统的检测概率。

由图 8 可知,在 600km 轨道高度上,当天线幅宽低于临界幅宽(800nm)时,随着幅宽的增大,船只检测概率逐渐增大;当天线幅宽大于 800nm 时,随着幅宽的增大,船只检测概率逐渐变小,并

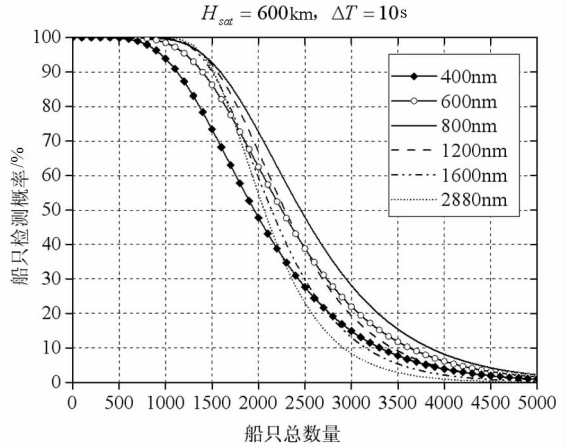


图 8 不同幅宽下检测概率对比图

Fig. 8 Comparison of ship detection probabilities under different swaths

且临界幅宽两侧范围内船只检测概率比较接近。然而,必须注意的是:实际情况下,幅宽越大、覆盖范围也越大、船舶总数也越多。因此,应考虑采用方向天线,且天线幅宽应选择为小于或等于对应轨道高度下的临界幅宽^[10]。

3.5 B 类船舶的影响分析

上述对星载 AIS 系统检测概率影响因素的分析都只考虑了 A 类 AIS 船舶,然而,除了 A 类 AIS 发射机之外,船舶还可能携带 B 类 AIS 发射机。虽然这类信号的发射功率更小、报告周期更长,但是由于数量庞大,仍然会对 A 类 AIS 信号接收产生一定影响^[11]。考虑到 B 类 AIS 船舶分布的不确定性,本节采用泊松分布模型进行分析,主要研究 A 类 AIS 船舶的检测概率。

考虑到 A、B 类 AIS 船舶发射的信号随机进入某个时隙,因此可以认为进入某个时隙内的 AIS 信号数目服从泊松分布,即同时接收到 n 个信号的概率 $p(n)$ 为^[12]

$$p(n) = e^{-\lambda\tau} \frac{(\lambda\tau)^n}{n!} \tag{21}$$

假设在系统覆盖范围内,A 类 AIS 船舶总数为 NA , B 类 AIS 船舶数目为 NB ,相应的信号报告周期分别为 ΔT_A 、 ΔT_B 。则在某个时隙内,某个被观测的 A 类 AIS 船舶不与其他任何船舶发生冲突的概率为

$$p_{\Delta T_A} = p(0) = e^{-\lambda\tau} \tag{22}$$

式(22)中, $\lambda = (NA - 1)/\Delta T_A + k_p \cdot NB/\Delta T_B$, k_p 表示 B 类 AIS 信号相对 A 类 AIS 信号的功率折算因子,取为 1/5; $\tau = 1.7\tau_0/2$, 其中 $\tau_0 = 26.67\text{ms}$ 为一个标准时隙长度。

因而,在观测时间 T_{obs} 内,考虑 B 类 AIS 船舶

影响下,星载 AIS 系统对 A 类 AIS 船只的检测概率为

$$P = 1 - (1 - p_{\Delta T_A})^{\frac{T_{obs}}{\Delta T_A}}$$

$$= 1 - (1 - e^{-1.7[(NA-1)/\Delta T_A + k_p \cdot NB/\Delta T_B] \cdot \tau_0/2})^{\frac{T_{obs}}{\Delta T_A}} \quad (23)$$

本例中,选择 $\Delta T_A = 10s$, $\Delta T_B = 30s$,分别仿真了不同船只比例下,星载 AIS 系统对 A 类船舶的检测概率,如图 9 所示。可以看出,当船只总数量一定时,B 类船舶对 A 类船舶检测概率的影响程度要远小于 A 类船舶自身的影响。此外,还可以看出,额外增加的 B 类船只对 A 类 AIS 船只检测概率的影响基本可以忽略。如图中曲线所示,当覆盖范围内只有 A 类船舶时,A 类船舶数量为 1500 时,检测概率约为 90%;额外增加 1500 艘 B 类船只后,检测概率为 80%;额外增加 4500 艘 B 类船只后,检测概率为 70%。因而,B 类船只对系统检测概率的影响在数量上约等效于 A 类船只的 $1/30^{[5]}$,这主要是因为 B 类船只 AIS 信号的发射周期长、发射功率低。

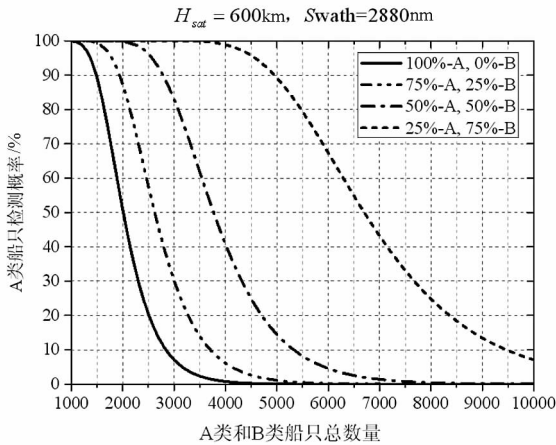


图9 B类船舶对A类船舶检测概率的影响曲线图

Fig.9 Effect of Class B ships on Class A ships on detection probability

4 结论

本文对星载 AIS 系统检测概率进行了分析和研究。建立了基于船舶分布的检测概率模型并修正了观测时间的影响。通过对时隙冲突、天线类型、船舶动态、轨道高度和 B 类船只影响的分析可以看出,该计算模型可以较好地适应不同船舶分布下载 AIS 系统的性能估计。仿真分析结果

从不同角度为改善星载 AIS 系统设计和提升船舶检测概率提供了有益参考,对我国进行星载 AIS 的进一步研究具有一定的指导意义。

参考文献 (References)

- [1] International Telecommunications Union. Satellite detection of automatic identification system messages [R]. ITU-R M 2084, 2006.
- [2] Wahl T, Høye G K, Lyngvi A, et al. New possible roles of small satellites in maritime surveillance [J]. Acta Astronautica, 2005, 56(1-2): 273-277.
- [3] 朱守中, 柳征, 姜文利. 基于能量量度的星载 AIS 信号自适应码元同步抽取算法 [J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(5): 73-77.
ZHU shouzhong, LIU Zheng, JIANG Wenli. Self-adapting arithmetic of decimation and synchronisation of space-based AIS signals based on energy measurement [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(5): 73-77. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] Cervera M A, 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.
- [6] Høye G. Observation Modelling and detection probability for space-based AIS reception [R]. REPORT - 2004/04390, Norwegian Defence Research Establishment, 2004.
- [7] 王聪, 柳征, 姜文利, 等. 一种新的星载自动识别系统检测概率计算方法 [J]. 宇航学报, 2013, 34(3): 395-401.
WANG Cong, LIU Zheng, JIANG Wenli, et al. A new selection probability computation method for satellite-based AIS [J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(3): 395-401. (in Chinese)
- [8] Høye G. Space-based AIS-theoretical considerations and system parameter optimization [R]. REPORT - 2006/02495, Norwegian Defence Research Establishment, 2006.
- [9] 万坚, 涂世龙, 廖灿辉, 等. 通信混合信号盲分离理论与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 325-335.
WAN Jian, TU Shilong, LIAO Canhui, et al. Theory and technology on blind source separation of communication signals [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 325-335. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] Norris A. Automatic identification systems-the effects of class B on the use of class A systems [J]. Journal of Navigation, 2006, 59(2): 335-347.
- [12] Tunaley J K E. Cataloging internet resources [J/OL]. A Stochastic Model for Space-Borne AIS, 2005-08-14 [2013-7-20]. <http://www.london-research-and-development.com/AIS.html>