

拒止环境下的塔康欺骗干扰

李光明, 田孝华, 鲁凯彬, 孙博, 史密

(空军工程大学信息与导航学院,西安,710077)

摘要 为解决塔康欺骗信号在接收机处捕获率不高的问题,设计了通过施加带限白噪声构建拒止环境,掩护干扰信号进入机载接收机,提高欺骗信号相对捕获概率的新干扰模式。首先分析了塔康测距解算时噪声信号对解算结果的影响,研究了该干扰模式下所需欺骗干扰功率随干扰机与飞机距离的变化情况,进而分析了欺骗信号在施加带限白噪声协助下相对捕获概率随干信比的变化。最后通过仿真验证,证明所提出的欺骗干扰模式可以实现对真实测距应答信号的有效压制,使欺骗信号成功被机载接收机捕获。

关键词 塔康测距,拒止环境,白噪声,相对捕获概率

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.02.013

中图分类号 TN961;V249.3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)02-0064-06

Research on TACAN Deception Jamming Based on Denial Environment

LI Guangming, TIAN Xiaohua, LU Kaibin, SUN Bo, SHI Mi

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: To cope with the problem that the acquisition probability of jamming signals in the TACAN receiver is too low, a new jamming model based on the denial environment is proposed in this paper. Firstly, the influence of noise on the computed results is studied. Secondly, the deception jamming power changed along with distance between the airborne and the jammer is analyzed. Then, the relative acquisition probability of the deception signals changed along with the JSR (jam to signal ratio) is analyzed. Finally, the effectiveness of the jamming model is proved by simulation.

Key words: TACAN ranging; denial environment; white noise; relative acquisition probability

塔康是“战术空中导航”(TACTical Air Navigation)的英文缩写“TACAN”的汉语音译名称。由于该系统的有效作用距离在近程导航范围内且只用于航空导航,因此又称为航空近程导航系统^[1]。

塔康系统测位测距的精度高,系统容量大,可靠性比较高,天线体积小,便于机动,在飞机的出航归航,沿航路飞行以及机群的空中编队中都发挥着重

要的作用^[2]。

目前,欺骗干扰主要采用“先压制后欺骗”的干扰模式,使接收机在搜索阶段捕获欺骗信号。文献[2]重点针对瞄准压制式干扰方法对塔康系统的干扰效果进行了分析,比较了使用单个干扰源和多个干扰源所构成的干扰区域的不同,但这种干扰方式只能对塔康信标进行压制性干扰,无法实现欺骗;文

收稿日期:2015-12-21

基金项目:国家自然科学基金(61273049)

作者简介:李光明(19918-),男,山东高密人,硕士生,主要从事导航对抗研究,E-mail:15686492137@163.com

引用格式:李光明,田孝华,鲁凯彬,等.拒止环境下的塔康欺骗干扰[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(2):64-69. LI Guangming, TIAN Xiaohua, LU Kaibin, et al. Research on TACAN Deception Jamming Based on Denial Environment[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(2): 64-69.

献[3]提出对塔康信标实施饱和询问式干扰,使塔康信标无法对飞机的测距询问信号进行有效应答,进而使飞机不能进行正确的测距。然而,该模式在一般的背景环境中接收机捕获真实信号和欺骗信号的概率相近,欺骗信号的功率优势得不到有效的发挥,干扰效率不高。因此,结合传统的塔康干扰手段设计合理的欺骗干扰模式,以提高目标接收机对欺骗信号的捕获性能,对成功实施欺骗显得尤为重要。

本文在分析塔康机载接收机对测距应答信号的检测概率的基础上,设计了一种基于拒止环境的塔康欺骗式干扰方法^[4-5],即在向飞机发射干扰信号的同时发射一定功率的带限白噪声来构建拒止环境,掩护欺骗信号进入接收机,从而提高欺骗信号的捕获概率,增强干扰效果。该方法以欺骗信号的相对捕获概率为干扰效果评价标准,同时分析了为达到干扰效果所需的干扰功率,以及施加不同功率带限白噪声干扰信号接收机对欺骗信号的捕获解算情况。通过仿真验证,本文提出的干扰方法可以实现对真实信号有效压制,欺骗信号能够被接收机成功捕获并解算,达到期望干扰效果。

1 塔康欺骗干扰模型

1.1 塔康测距的基本原理

塔康系统采用询问回答式脉冲测距原理。机载设备发射询问脉冲,地面信标接收到询问信号后,经过一定的时延发射应答信号。机载设备接收到回答信号先进行译码,将脉冲对转变为单脉冲,然后测量发射信号和接收信号之间的时延来实现测距,具体计算公式为^[6-8]:

$$r = \frac{1}{2}c(t - t_0) \quad (1)$$

式中: t 为发射信号与接收信号之间的时间差; t_0 为地面信标对测距询问信号的延时处理时间; r 为飞机与塔康信标的距离。塔康系统在实际的时间测量过程中,是测量 2 个准钟形脉冲之间的时间差来计算时延的。塔康信号标准中规定,准钟形脉冲的半功率宽度为 $3.5 \mu\text{s}$,因此钟形脉冲信号的表达式为:

$$s(t) = e^{-\beta t^2} \quad (2)$$

式中: $\beta = -\frac{\ln 0.5}{1.75^2}$ 。

1.2 塔康欺骗干扰理论方法

在时域机载设备接收到的信号表示为:

$$r(t) = as(t) + \sum_{i=1}^n b_i s(t + \tau_i) + cs(t + \tau) + j(t) \quad (3)$$

式中: $s(t)$ 是塔康信标发射的信号; $s(t + \tau_i)$ 是多

径信号; $s(t + \tau)$ 是干扰机发射的欺骗信号; a 、 b_i 、 c 分别是信号的幅度; τ_i 是多径时延; τ 是干扰信号相对真实信号的时延; $j(t)$ 是带限白噪声,具体信号为:

$$j(t) = \sqrt{2P_J}n(t)\cos(2\pi f_c t + \theta) \quad (4)$$

式中: P_J 为噪声信号的功率; $n(t)$ 为基带白噪声信号; f_c 为塔康信号的载波频率; θ 是干扰信号的初始相位。

将此信号通过 FFT 变换到频域为:

$$R(f) = aS(f) + \sum_{i=1}^n b_i S(f)e^{j2\pi\tau_i} + cS(f)e^{j2\pi\tau} + J(f) \quad (5)$$

对式(5)变换如下:

$$R(f) = S(f)\left(a + \sum_{i=1}^n b_i e^{j2\pi\tau_i} + ce^{j2\pi\tau}\right) + J(f) \quad (6)$$

由式(6)可以看出,多径信号和干扰信号与真实信号在频谱上只有相位上的差异。在塔康机载设备的实际处理中通常是采用将信号在频谱相除进而逆快速傅里叶变换(Inverted Fast Fourier Transform,IFFT)的方法进行信号时延的估计^[9-10]。在频域将得到的合成信号与塔康信标发射的真实信号相除,得到:

$$\frac{R(f)}{S(f)} = \frac{S(f)}{S(f)}\left(a + \sum_{i=1}^n b_i e^{j2\pi\tau_i} + ce^{j2\pi\tau}\right) + \frac{J(f)}{S(f)} = \left(a + \sum_{i=1}^n b_i e^{j2\pi\tau_i} + ce^{j2\pi\tau}\right) + \frac{J(f)}{S(f)} \quad (7)$$

对上式进行 IFFT 处理得到:

$$F^{-1}\left(\frac{R(f)}{S(f)}\right) = (a\delta(t) + \sum_{i=1}^n b_i \delta(t + \tau_i) + c\delta(t + \tau)) + F^{-1}\left(\frac{J(f)}{S(f)}\right) \quad (8)$$

由式(8)可以看出,时延位置(包括多径信号和干扰信号)会出现峰值。当噪声能量较小时,噪声的影响可以忽略。但是当信噪比较小时,在解算时必须考虑噪声的影响,较大的噪声的能量会使峰值淹没在噪声信号之中。由此可知可以在发射较大能量塔康测距应答欺骗信号的同时,发射一定能量的带限白噪声,实现对真实信号的压制,利用噪声掩护欺骗信号注入接收机。

在对真实信号压制干扰时,使用带限白噪声信号是因为:

1)塔康虽然在 X 和 Y 工作模式下各有 126 个工作波道,但在任一时刻机载接收机只有一个波道处于工作状态,使用带限白噪声针对塔康机载接收机实施瞄准式干扰,相对宽带连续拦阻式干扰和宽带梳状拦阻式干扰等在多个频率上施加干扰信号,可以提高干扰功率的利用效率^[11-12]。

2)采用带限白噪声,对带宽内信号施加相同功

率的干扰,在满足对真实信号压制干扰的同时,接收机对欺骗信号能够进行正确解算,达到欺骗干扰的目的。

1.3 基于拒止环境的塔康欺骗干扰系统组成

基于拒止环境的塔康测距干扰示意图见图1。飞机在飞行过程中同时接收到塔康信标和我方的干扰机发射的应答信号。

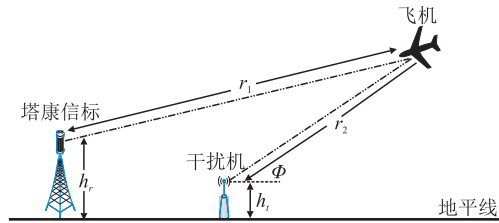


图1 塔康测距干扰示意图

Fig.1 TACAN ranging jamming diagram

图中 r_1 为塔康信标距离飞机的距离, r_2 为干扰机与飞机的距离, h_r 为塔康信标接收天线高度, h_t 为干扰机发射天线高度, φ 为飞机相对于干扰机的仰角。

在本文所提出的干扰模式下,机载接收机同时接收到由塔康信标发射的真实的应答信号,多径效应引起的多径信号,干扰机发射的欺骗信号和由噪声源发射的带限白噪声。白噪声的加入会同时影响到真实信号和欺骗信号的解算。此时接收机捕获真实信号和欺骗信号的概率都会下降,但是欺骗信号的功率要大于真实信号的功率。通过调整发射带限白噪声信号的功率,使得真实信号不能进行正确的解算,而欺骗信号可以较好的解算,这样相当于提高了欺骗信号的捕获概率,使得机载设备无法进行正确测距^[13-14]。

使用此干扰模式进行欺骗干扰有以下2个优势:

①带限白噪声对真实信号的影响要大于对欺骗信号的影响,通过调整噪声源功率的大小可以让真实信号淹没在噪声中,协助欺骗信号进入机载接收机;②即使接收机能够接收到真实信号,但是接收到真实信号的概率较低,不能达到塔康进行时延解算所需要的回答概率,因此机载接收机长时间处在搜索捕获状态,这样机载设备依然无法进行有效的测距。

2 塔康欺骗干扰功率分析及仿真

2.1 欺骗信号干扰功率分析

由上面的分析可知,在拒止环境下对塔康进行干扰,重点是欺骗信号的功率要大于真实信号的功率,否则就不能利用白噪声掩护欺骗信号进入机载接收机^[15-18]。因此有必要对信号干扰功率随距离的

变化情况进行分析。

机载接收机接收到的真实信号的功率为:

$$P_{r,s} = \left(\frac{\lambda}{4\pi r_1}\right) G_{t,s} G_{r,s} P_{t,s} \quad (9)$$

式中: $P_{t,s}$ 为塔康信标发射信号功率; $G_{t,s}$ 为信标发射天线增益;实际值与塔康信标天线方向图和发射的方向有关; $G_{r,s}$ 为机载接收机天线接收增益; λ 为接收信号的波长; r_1 为塔康信标与飞机的距离; $P_{r,s}$ 为机载接收机接收到信标发射信号的功率。

机载接收机接收到干扰信号的功率为:

$$P_{r,i} = \left(\frac{\lambda}{4\pi r_2}\right) G_{t,i} G_{r,i} P_{t,i} \quad (10)$$

式中: $P_{t,i}$ 为干扰机发射信号功率; $G_{t,i}$ 为干扰机发射天线增益; $G_{r,i}$ 为机载接收机天线接收干扰信号的增益; λ 为接收信号的波长; r_2 为干扰机与飞机的距离; $P_{r,i}$ 为机载接收机接收到的干扰机所发射信号的功率。

2.2 欺骗信号干扰功率仿真

由于塔康是近程航空导航系统,仿真分析用于计算使塔康系统在80 km以外的区域测距失效时,干扰机需要发射的功率。结合实际情况,仿真参数具体取值为 $P_{t,s} = 2000$ W, $G_{r,s} = 1$, $\lambda = 0.3$ m, $r_1 = 40$ km, $G_{r,i} = 1$,为达到干扰效果,要求 $P_{r,i}/P_{r,s} = 2$, $G_{t,i}$ 相对 $G_{t,s}$ 的取值由塔康信标的方向图以及干扰机离信标的距离等因素确定。

由式(9)和式(10)可得,干扰机发射信号功率 $P_{t,i}$ 为:

$$P_{t,i} = 2 \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 \frac{G_{t,s} G_{r,s}}{G_{t,i} G_{r,i}} P_{t,s} \quad (11)$$

计算结果见表1。

表1 干扰机发射功率与飞机与干扰机距离的关系

Tab.1 The relationship between the jamming power and distance

r_2 /km	2	4	6	8	10
φ /($^\circ$)	1.5	1.0	0.5	0.5	0.3
$G_{t,i}$	0.400	0.500	0.707	0.707	0.707
$P_{t,i}$ /W	0.56	5.80	14.70	46.70	110.00

3 捕获性能分析

3.1 欺骗信号和真实信号的检测概率

信号进入机载接收机后首先进行信号的检测,由信号检测与估计理论可知,机载接收机对收到信号的捕获概率为:

$$P = \int_{\gamma}^{\infty} p \cdot dl = \int_{\frac{N_0}{2} \ln \gamma + \frac{E_s}{2}}^{\infty} \left(\frac{1}{\pi N_0 E_s}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{l^2}{N_0 E_s}\right) dl \quad (12)$$

式中: γ 是机载设备判定信号为回答脉冲的检测门限, $\gamma = \frac{N_0}{2} \ln \eta + \frac{E_s}{2}$; η 是似然比检测门限; N_0 是发射的噪声信号的功率谱密度; E_s 是应答信号的功率, 对上式进行整理得:

$$P = \int_{\sqrt{\frac{N_0}{2E_s} \ln \eta + \frac{1}{2}} \sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}}^{\infty} \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du = Q[\ln \eta / d - d / 2] \quad (13)$$

式中: Q 为标准高斯分布的右尾积分; $d^2 = \frac{E_s}{N_0}$ 为信噪比。由式(13)可以分别计算出干扰信号和真实信号的检测概率^[19]。由此可以得知检测概率与信噪比直接相关, 信噪比越大, 检测概率越大。

塔康机载接收机根据捕获的应答信号数量和询问信号数量的比值来确定接收的信号是否为正确的应答信号。控制施加的带限白噪声功率, 降低信噪比, 使飞机对真实信号的检测概率低于塔康检测门限值, 对欺骗信号的检测概率高于门限值, 达到干扰效果。当信噪比取值 6~12 dB, 接收机处白噪声信号的功率与真实信号功率比值 $P_J/P_{r,s}$ 分别为 0 dB, 2 dB, 4 dB, 6 dB 时信号检测概率的变化情况见图 2。

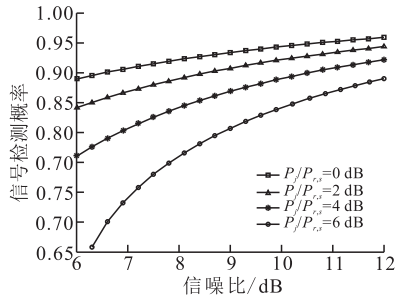


图 2 信号检测概率随信噪比变化情况

Fig.2 Detection probability changed with SNR

由图 2 可知, 随着信噪比的增加, 信号的检测概率也在增加; 当施加白噪声干扰时, 信号的检测概率下降, 并且施加的白噪声的功率越大, 信号的检测概率下降越大。这说明通过施加白噪声可以有效降低信号的检测概率。

3.2 欺骗信号的相对捕获概率

欺骗成功与否, 关键在于机载接收机接收真实信号和欺骗信号的相对概率^[20]。因此有必要计算欺骗信号的相对捕获概率随干信比的变化。假设接收机捕获门对准真实信号的概率为 α , 真实信号的检测概率为 P_t , 对准欺骗信号的概率为 β , 欺骗信号的检测概率为 P_f , 那么欺骗信号的相对捕获概率则为:

$$P = \frac{\beta P_f}{\alpha P_t + \beta P_f} \quad (14)$$

假设干信比取值 4~12 dB。由于机载接收机的捕获门的宽度有限, 在进行欺骗干扰时, 干扰信号与真实信号到达接收机的时间不能相差太大, 否则不能捕获到干扰信号。因此可以认为 $\alpha = \beta = 0.5$, 仿真结果见图 3。

由图 3 可以看出, 施加相同功率的带限白噪声, 欺骗信号的相对捕获概率随干信比的增加在不断增加。同时可知, 随着施加噪声功率的增大, 欺骗信号的相对捕获概率在提高。这是因为欺骗信号的功率大于真实信号功率, 此时, 真实信号已经受到强烈干扰, 接收机不能对其解算, 而欺骗信号可以继续被捕获。当白噪声功率与真实信号功率比值 $P_J/P_{r,s}$ 分别为 4 dB 或 6 dB 时, 欺骗信号的相对捕获概率一直处于 0.7~0.8 之间, 此时, 机载接收机对欺骗信号的捕获概率明显大于真实信号, 达到期望的干扰效果。

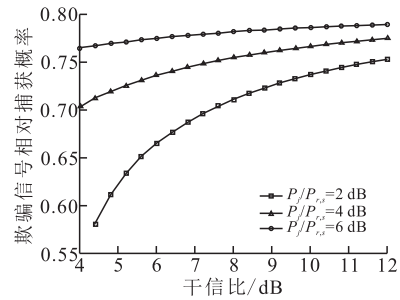


图 3 欺骗信号相对捕获概率随干信比变化情况

Fig.3 Relative acquisition probability changed with JSR

4 干扰效果验证

机载设备接收到的信号包括直达的真实应答信号、多径信号、欺骗信号以及带限白噪声信号, 直达波信号的幅度设为 1, 多径信号 1 的幅度设为 2, 多径信号 2 的幅度设为 3, 欺骗信号的幅度设为 5, 多径信号相对直达真实信号的时延分别为 20 μ s 和 40 μ s, 欺骗信号相对直达真实信号的时延为 60 μ s。噪声源发射的噪声为带限高斯白噪声, 采样率设为 10 MHz。采用本文提出的欺骗干扰方法, 对于接收到的信号首先进行 FFT 变换, 与参考信号的频谱相除后作 IFFT 变换, 得到的接收机输出信号的波形见图 4。

图 4(a) 为未施加白噪声干扰时机载接收机接收到的应答脉冲, 4 个信号全部可以检测出; 图 4(b) 为施加白噪声干扰满足 $P_J/P_{r,s} = 2$ dB 时接收机接收到的信号波形, 从中可以看出, 接收机可以检测出一个多径信号和干扰信号, 真实信号被抑制, 同时欺骗信号的幅度降低, 这是因为施加的带限白噪声对

直达真实信号,多径信号和欺骗信号都有抑制作用;图4(c)为施加白噪声干扰满足 $P_J/P_{r,s}=4$ dB时接收机接收到的信号波形,与图4(b)不同在于真实信号和2个多径信号被全部抑制,接收机只能检测出干扰信号;图4(d)为施加白噪声干扰满足 $P_J/P_{r,s}=6$ dB时接收机接收到的信号波形,与图4(c)不同在于此时接收机输出的干扰信号的幅度变小,因此在施加噪声时应该进行功率控制。通过仿真得知,在施加测距欺骗干扰信号的同时施加带限高斯白噪声,可以有效地抑制真实信号,提高欺骗信号的捕获概率。

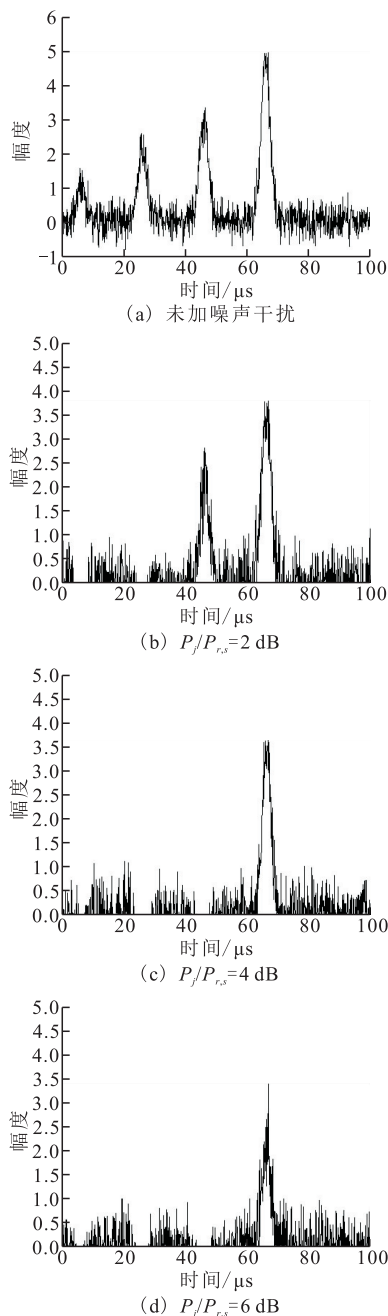


图4 接收机输出信号波形

Fig.4 Output waveform of receiver

5 结语

本文设计了通过构建拒止环境,提高欺骗信号的相对捕获概率的塔康干扰新模式。当用于构建拒止环境的带限白噪声功率满足 $P_J/P_{r,s}=4$ dB或6 dB时,在本文提出的干扰模式下,欺骗信号相对捕获概率介于0.7~0.8之间,明显大于真实信号的捕获概率。通过仿真验证,证明拒止环境下的欺骗干扰能够实现对真实信号有效压制,欺骗信号成功被接收机捕获解算。与传统干扰方法相比,该干扰方法有效提高了欺骗信号的相对捕获概率。

本文从理论上对拒止环境下的欺骗式干扰效果进行分析,至于塔康干扰机所发射信号相对真实信号的具体时延以及实际应用中所需施加的白噪声和干扰信号最优功率,在接下来的研究中将会进一步深入研究。

参考文献(References):

- [1] 吴德伟,赵修斌,田孝华.航空无线电导航系统[M].北京:电子工业出版社,2012.
WU Dewei, ZHAO Xiubin, TIAN Xiaohua. Airborne Ratio Navigation System [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012. (in Chinese)
- [2] 章桂永,刘湘伟,胡波,等.对塔康导航系统干扰效能评估及仿真研究[J].电光与控制:自然科学版,2011,18(9):6-10,72.
ZHANG Guiyong, LIU Xiangwei, HU Bo, et al. Research on Jamming Effectiveness Evaluation and Simulation of TACAN [J]. Electronics Optics and Control: Natural Science Edition, 2011, 18(9): 6-10, 72. (in Chinese)
- [3] 何智钦,金伟.基于欺骗式塔康干扰技术与仿真[J].现代防御技术,2013,41(2):107-111.
HE Zhiqin, JIN Wei. Research and Simulation on Jamming Technology in TACAN Based on Deception Method [J]. Modern Defence Technology, 2013, 41(2): 107-111. (in Chinese)
- [4] 李冀.国外提升卫星信号在拒止环境下导航定位能力的新技术[J].导航与定位学报,2013,1(2):55-59.
LI Ji. New Technologies Developed for Promoting PNT Capability in GPS Denial Environment [J]. Journal of Navigation Positioning, 2013, 1(2): 55-59. (in Chinese)
- [5] 陈坤,田孝华,何晶,等.一种基于 Huber 函数的塔康方位稳健估计算法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2013,14(6):18-22.
CHEN Kun, TIAN Xiaohua, HE Jing, et al. A Robust Estimation Algorithm of TACAN Azimuth Based on

- Huber Function[J].Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2013,14(6):18-22. (in Chinese)
- [6] Altman E, Avrachenkov K, GarnaeV A. Jamming in Wireless Networks Under Uncertainty [J]. Mobile Network, 2011(16):246-254.
- [7] CHEN Lin, Leneutre J. Fight Jamming with Jamming- A Game Theoretic of Jamming Attack in Wireless Networks and Defence Strategy [J]. Computer Networks, 2011, 55(9):2259-2270.
- [8] 田孝华, 李睿, 王维康. 有效估计塔康测距信号多径时延的方法 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9):2273-2276.
TIAN Xiaohua, LI Rui, WANG Weikang. An Efficient Time Delay Estimation Algorithm for Multipath Signal of Distance Signal in TACAN System [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32(9):2273-2276. (in Chinese)
- [9] QI Dong, LIU Donggang, Wright M. Mitigating Jamming Attacks in Wireless Broadcast Systems [J]. Wireless Networks, 2013, 19(8):1867-1880.
- [10] RAO Shijun, JIANG Ning, LIU Dongli. Design to Cancel Shared-Frequency Jamming between Coherent-radar [J]. Energy Procedia, 2011, 13(11):1-10380.
- [11] WANG Wenjing, BHATTACHARJEE S, CHATTERJEE M, et al. Collaborative Jamming and Collaborative Defence in Cognitive Radio Networks [J]. Pervasive and Mobile Computing, 2013, 9(4):572-587.
- [12] 赵树杰, 赵建勋. 信号检测与估计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
ZHAO Shujie, ZHAO Jianxun. Signal Detection and Estimation [M]. Beijing: Tsinghua University Press. (in Chinese)
- [13] POISEL Richard A. 现代通信干扰原理与技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
Richard A. Poisel. Modern Communications Jamming Principles and Techniques [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [14] GAO Jianming, CHENG Bin, LIU Yan, et al. Behavioral Modeling and EMC Analysis for TACAN System [C] // IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation & Emc Technologies for Wireless Communication. Beijing, 2011:576-579.
- [15] WANG Hailiang, LIU Ruihua. DME/TACAN Interference Mitigated by Mixed Blanking in B2 Band [C] // IEEE International Conference on Communication Technology Jinan, 2011:897-900.
- [16] GAO Peng, MENG De-xiang, CHENG Nan, et al. Non-cooperative Power Control Game for Adaptive Modulation and Coding [J]. Science Direct, 2010, 17(3):31-37.
- [17] 谭忠吉, 常硕, 李娜. 某型塔康机载设备特性研究 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(1):87-89.
TAN Zhongji, CHANG Shuo, LI Na. Research on Characteristics of Airborne TACAN [J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(1):87-89. (in Chinese)
- [18] 毛虎, 吴德伟, 闫占杰. 针对 GPS 接收机性能的压制干扰区域分析 [J]. 宇航学报, 2014, 35(9):1078-1086.
MAO Hu, WU Dewei, YAN Zhanjie. Analysis of Blanket Jamming Range Based on Performance of GPS Receiver [J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(9):1078-1086. (in Chinese)
- [19] WANG Rui, JI Hong, LI Xi. Energy Efficiency Based Multi-relay Selection and Power Allocation in OFDM Cooperation Networks [J]. ELSEVIER, 2014, 21(3):10-17.
- [20] BHATTACHARYA S, BASAR T. Spatial Approaches to Broadband Jamming in Heterogeneous Mobile Networks: A Game-theoretic Approach [J]. Autonomous Robots, 2011, 31(4):376-381.

(编辑:徐楠楠)