

机载航电系统射频隐身性能多域联合评估方法*

王谦喆¹, 何召阳¹, 宋博文², 王锦江¹, 任宝祥¹, 李寰宇¹

(1. 空军工程大学空管领航学院, 陕西西安 710051;

2. 西安科技大学测绘科学与技术学院, 陕西西安 710054)

摘要:针对机载航电系统自身辐射源特性,提出一种不依赖敌方探测设备的机载航电系统射频隐身性能评估方法。分析机载航电系统设备在极化域、波形域、能量域中影响射频隐身性能的因素,构建极化域、能量域、波形域射频隐身指标,打破常规的“辐射-接收”模型的隐身性能评估方法,建立基于机载航电系统自身辐射信号工作状态和工作参数的射频隐身定量评估方法。对机载雷达系统进行仿真评估,结果表明,该评估方法能正确反映机载雷达系统的射频隐身性能。

关键词:电子系统;性能评估;射频隐身;多域联合;机载雷达系统

中图分类号:TN978 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2018)01-121-05

Multi-domain joint evaluation method for RF stealth performance of airborne avionics system

WANG Qianzhe¹, HE Zhaoyang¹, SONG Bowen², WANG Jinjiang¹, REN Baoxiang¹, LI Huanyu¹

(1. ATC Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: According to the characteristics of the airborne avionics system, a method for evaluating the RF (radio frequency) stealth performance of the airborne avionics system was presented. The factors that influence the performance of the airborne avionics system in the polarization domain, wave domain and energy domain were analyzed, the RF stealth index of the waveform domain, polarization domain and the energy domain were constructed, an RF stealth evaluation method of the traditional “radiation reception” model was broken. And a quantitative evaluation method of radio frequency stealth based on the working state and working parameters of airborne avionics system was established. Finally, a simulation evaluation of airborne radar system was carried out. Results show that the proposed method can correctly reflect the RF stealth performance of airborne radar system.

Key words: electronic system; performance evaluation; radio frequency stealth; multi domain association; airborne radar system

在信息技术飞速发展的今天,打赢信息化、高技术条件下的局部战争成为各国军队发展的主流,信息化军事装备的快速更新换代离不开军事技术的有效支撑,武器装备的技术水平已成为夺取未来战争的主动权和战争胜利的重要因素。战斗机作为空战的主要武器装备,是争夺制空权的中坚力量,航空器的隐身、反隐身^[1]是未来空中攻防作战的基本特征和发展趋势。相比较雷达隐身和红外隐身,射频隐身是机载航电系统层面的综合技术问题。目前,在雷达隐身和红外隐身性能评估领域,研究已经相对成熟,性能评估指标也很清晰。相对而言,对射频隐身性能评估问题的研究和认识还较为薄弱,尚处于发展阶段^[2-3]。

近年来,国内对射频隐身性能评估的研究逐渐深入,主要分两个方面:文献[4-9]以“辐射-截获”模型为基础,采用联合截获率和信号截获率等指标对辐射源和截获接收机之间的射频隐身性能进行评估。文献[10-12]基于机载航电系统自身辐射信号,通过对信号特征进行分析,对辐射源射频隐身性能进行评估。目前,在射频隐身性能评估领域目前没有通用的指标和方法,大多数射频隐身性能评估都是基于特定的战场模型,需要预设较多的前提条件,还需要考虑敌方截获接收机的性能和天气、地形等因素,如果某个因素发生变化,评估结果将不再适用,采用方法具有很大的局限性。

* 收稿日期:2016-10-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61502523);陕西省电子信息系统系统集成重点实验室资助项目(201501A)

作者简介:王谦喆(1978—),男,陕西西安人,副教授,硕士,硕士生导师,E-mail:wbandydt@163.com;

李寰宇(通信作者),男,讲师,博士,E-mail:afeu_hzy@163.com

1 射频隐身因子计算原理及方法

1.1 极化域射频隐身因子计算原理及方法

基本原理: 根据极化态随时间的变化函数 $p(t)$, 提取变化函数的周期 T_p , T_p 的取值范围为 $T_p \geq 0$; 当极化态恒定时, 即 $T_p = 0$ 时, 雷达信号相对容易被截获跟踪, 在极化域射频隐身性能最差, 则 $\sigma_p = 1$; 当极化态变化较大时, 即 $T_p \rightarrow \infty$ 时, 雷达信号被截获的概率最小, 在极化域该辐射源的射频隐身能力最好, 此时 $\sigma_p = 0$ 。极化态周期变化时, 辐射源的极化域射频隐身能力为介于 0 和 1 之间的一个数字, 比如, 辐射源发射信号的极化态每 1 s 变化一次, 如从垂直极化变为水平极化, 则 $T_p = 1$ 。

根据机载航电系统自身辐射源变化特征, 设定极化域射频隐身性能评估指标, 具体方法如下:

步骤 1: 设定机载航电系统的任务模式。根据实际军事需求, 将设备调至相应状态。例如: 机载雷达的空域搜索模式。

步骤 2: 获得辐射源辐射信号的极化状态。在步骤 1 确定功能的前提下, 根据辐射源工作机理和发射天线的形式, 获得辐射源发射天线向外辐射信号的极化状态, 例如, 圆极化、右旋极化、水平极化、左旋极化等。

步骤 3: 由信号的极化方式, 设定信号极化态随时间的变化公式 $p(t)$, 利用该函数的周期 T_p , 计算极化域的射频隐身因子 σ_p 。

综上所述, 极化域射频隐身因子 σ_p 必须满足如下条件:

$$\begin{cases} \sigma_p = 1, T_p = 0 \\ \sigma_p = 0, T_p \rightarrow \infty \\ \sigma_p \text{ 随 } T_p \text{ 单调递减} \end{cases}$$

$$\text{定义: } \sigma_p = 1 - \frac{2}{\pi} \arctan T_p \quad (1)$$

1.2 能量域射频隐身因子计算原理及方法

基本原理: 根据每个周期的能量值 $e(n) = \int_{(n-1)T}^{nT} |s(t)|^2 dt$, 提取该能量序列 $e(n)$ 的周期 T_e 。对于能量不变的情况, 即 $T_e = 0$ 时, 敌方截获接收机能迅速进行相干积累并探测跟踪信号, 在能量域其射频隐身性能最差, 因此 $\sigma_e = 1$; 当能量变化范围较大时, 即 $T_e \rightarrow \infty$, 截获接收机无法及时调整并截获辐射源信号, 则在能量域辐射源射频隐身性能最好, 此时 $\sigma_e = 0$; 在能量域, 辐射源的射频隐身性能在 0 和 1 之间变化。计算步骤如下:

步骤 4: 获得辐射源辐射信号的时域波形 $s(t)$ 。
在步骤 1 确定功能的前提下, 根据辐射源的工作模式, 得到信号的时域波形。

步骤 5: 信号时域波形周期为 T , 根据辐射源的脉冲产生机理, 从时域波形中提取其周期 T ;

步骤 6: 将信号的每个周期进行计算, 生成能量序列 $e(n)$, 其中 n 表示周期数, 为大于等于 1 的自然数。定义

$$e(n) = \int_{(n-1)T}^{nT} |s(t)|^2 dt$$

步骤 7: 提取该信号能量序列 $e(n)$ 的周期, 为 T_e ; 如果能量值每隔两个周期相同, 则 $T_e = 3$;

步骤 8: 计算能量域的射频隐身因子 σ_e 。

满足如下条件的函数都可被用来作为能量域的射频隐身因子 σ_e :

$$\begin{cases} \sigma_e = 1, T_e = 0 \\ \sigma_e = 0, T_e \rightarrow \infty \\ \sigma_e \text{ 随 } T_e \text{ 单调递减} \end{cases}$$

$$\text{定义: } \sigma_e = 1 - \frac{2}{\pi} \arctan(T \cdot T_e) \quad (2)$$

主动辐射源极化域和能量域射频隐身性能定量评估方法的计算流程图如图 1 所示。

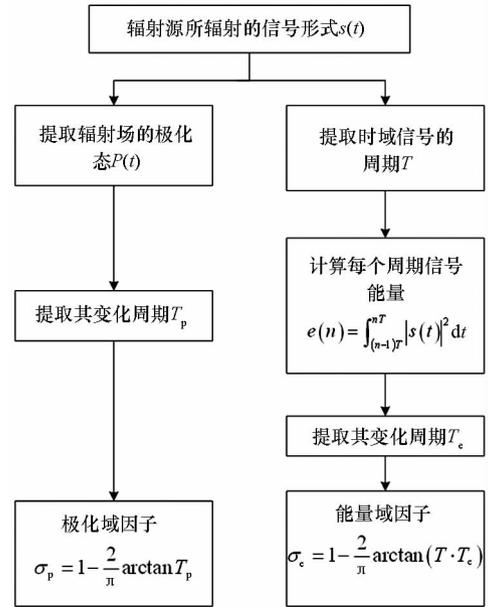


图 1 极化域和能量域射频隐身性能计算方法
Fig. 1 Calculation method of polarization domain and energy domain

1.3 波形域射频隐身因子计算原理及方法

基本原理: 以周期为出发点考虑, 在单位时间内脉冲串的数量越多, 周期就越短, 相对容易被截获到, 射频隐身性能就越弱; T 越大, 截获接收机在时域要进行长时间的检测, 信号射频隐身性能

越好。根据信号发送脉冲串的周期 T , 如果发射连续波形信号, 则 $T=0$, 如果发射随机间隔的脉冲串信号, 则 $T \rightarrow \infty$ 。周期参数隐身因子 $\sigma_w(T)$ 为介于 0 和 1 之间的数字。

从占空比的角度考虑, 占空比越大, 单位时间内积累的脉内信号就越多, 射频隐身性能越弱; 占空比越小, 单位时间内积累的信号越少, 越不易被探测到, 射频隐身性能越强。

从辐射源信号的脉内信号参数考虑, 假定有 N 个周期, 将某一周期的瞬时幅度、瞬时频率和瞬时相位进行提取, 组成长度都为 N 的瞬时期列, 计算其方差, 分别记为 σ_a 、 σ_f 和 σ_ϕ 。以瞬时幅度序列为例, 如果 $\sigma_a=0$, 则在脉内信号中 N 个周期的瞬时幅度都相同, 相对容易被截获接收机截获, 射频隐身性能较差。同理, σ_a 越大, 射频隐身性能越好。因此, 设定一个单调递减函数用来表征射频隐身因子, 将该单调递减函数选择为 $\cos(\arctan(\sigma_a))$, 瞬时频率和瞬时相位的分析同理。

基于以上分析, 综合考虑波形域中每个影响因子的权重, 计算机载航电系统辐射源波形域射频隐身性能评估指标, 具体步骤如下:

步骤 1: 根据具体的军事需求, 设定机载航电系统辐射源的任务模式;

步骤 2: 由辐射源时域波形的周期 T , 计算波形域中周期参数的射频隐身性能评估指标 $\sigma_w(T)$ 。可设

$$\sigma_w(T) = 1 - 2/\pi \arctan T \quad (3)$$

步骤 3: 生成波形域中关于占空比的射频隐身因子 σ_τ 。可设

$$\sigma_\tau = \tau/T \quad (4)$$

步骤 4: 根据单一周期内的脉内信号参数, 计算脉内信号的射频隐身因子 σ_{in} 。

计算单个周期的幅度、相位和频率, 组成长度为 N 的瞬时幅度矢量 \mathbf{A} 、瞬时频率矢量 \mathbf{F} 和瞬时相位矢量 Φ ; 通过计算其方差可得 σ_a 、 σ_f 和 σ_ϕ , 脉内信号的射频隐身性能评估因子可设为:

$$\sigma_{in} = \{1/3[\cos(\arctan(\sigma_a)) + \cos(\arctan(\sigma_f)) + \cos(\arctan(\sigma_\phi))]\}^{1/N} \quad (5)$$

通过在波形域上先整体后局部的分析得到周期、占空比和脉内信号参数, 若这三个参数中任一参数为 0, 则表示敌方接收机无法对该机载雷达进行有效接收。综上所述, 波形域射频隐身性能评估指标可表示为

$$\sigma_s = \sigma_w \cdot \frac{\tau}{T} \cdot \sigma_{in} \quad (6)$$

由此得到波形域射频隐身性能评估指标是区

间 $[0, 1]$ 的数值。该值越小意味着辐射源信号在波形域的射频隐身能力越好。

2 多域联合射频隐身性能评估方法

该评估方法包括: 第一步, 设置辐射源的正常工作状态, 提取辐射源向外发射的电磁信号; 第二步, 计算极化域的射频隐身因子; 第三步, 计算能量域的射频隐身因子; 第四步, 计算波形域的射频隐身因子; 第五步, 计算辐射源的多域联合射频隐身因子, 计算流程如图 2 所示。

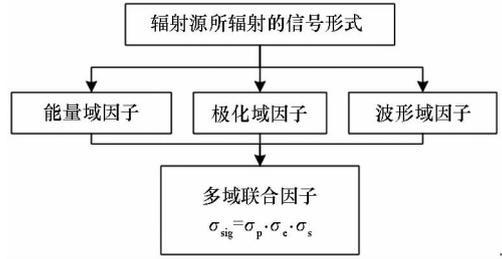


图 2 多域联合射频隐身性能定量计算方法

Fig. 2 Multi-domain united RF stealth performance evaluation method

图 2 中, 根据公式

$$\sigma_{sig} = \sigma_p \cdot \sigma_e \cdot \sigma_s \quad (7)$$

计算辐射信号的综合射频隐身因子。除此之外, 还可以采用指数加权的多域联合算法计算综合射频隐身因子的方法, 如 $\sigma_{sig} = (\sigma_p)^\alpha \cdot (\sigma_e)^\beta \cdot (\sigma_s)^\gamma$ 的形式, 根据具体情况将极化域、能量域和波形域赋予不同的指数权重, α 、 β 、 γ 为各加权因子, 取值范围均为大于零的数。

3 仿真计算

根据以上分析, 对处于 X 波段的美军 AN/APQ-13 机载导航与轰炸雷达和 AN/APQ-7 机载轰炸瞄准雷达^[13] 为仿真对象进行射频隐身性能评估, 参数如表 1 所示。

表 1 雷达参数

Tab. 1 Radar Parameters

雷达型号	AN/APQ-13	AN/APQ-7
名称	机载导航与轰炸雷达	机载轰炸瞄准雷达
体制	脉冲	脉冲
工作频率/MHz	9345 ~ 9405	9375 ~ 9405
作用距离/km	0.9 ~ 120	1 ~ 160
脉冲宽度/ μ s	2.25	2
重复频率(脉冲/s)	1300	1600

3.1 波形域射频隐身因子计算

机载雷达辐射信号的时域波形仿真如图 3 所示。

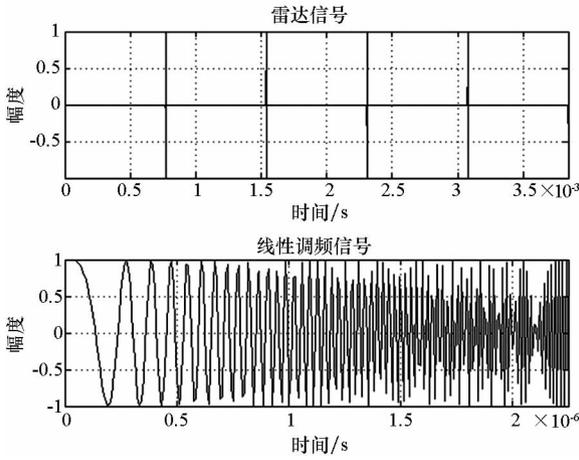


图 3 机载雷达辐射信号的时域波形

Fig. 3 Time domain waveform of airborne radar signal

图 3 展示了机载雷达的时域波形,在单一周期内,信号的时域频率是线性变化的。在图 3 中,波形周期 $T = 7.69 \times 10^{-4}$, 占空比 $\sigma_r = 0.0029$, 根据式(3)和式(4)可计算出周期参数的射频隐身性能指标和占空比射频隐身性能指标:

$$\begin{cases} \sigma_w(T) = 1 - \frac{2}{\pi} \arctan T = 0.5827 \\ \sigma_r = \frac{\tau}{T} = 0.0029 \end{cases} \quad (8)$$

在图 3 中可以看出辐射源信号的变化情况,由图 4 可看出信号内的瞬时频率、瞬时相位和瞬时幅度变化,通过计算可得瞬时参数的方差 σ_a 、 σ_f 、 σ_φ , 根据式(5)可得脉内信号参数射频隐身性能评估指标:

$$\sigma_{in} = 0.9959 \quad (9)$$

综上所述,根据式(6)可计算机载航电系统辐射源信号波形域射频隐身性能评估指标:

$$\sigma_s = \sigma_w \cdot \frac{\tau}{T} \cdot \sigma_{in} = 0.00168 \quad (10)$$

同理,对 AN/APQ-7 雷达信号仿真,可得波形域射频隐身性能指标如下:

$$\begin{cases} \sigma_{w1}(T_1) = 1 - \frac{2}{\pi} \arctan T_1 = 0.6444 \\ \sigma_{r1} = \frac{\tau_1}{T_1} = 0.0032 \\ \sigma_{in1} = 0.9954 \end{cases} \quad (11)$$

$$\sigma_{s1} = \sigma_{w1} \cdot \frac{\tau_1}{T_1} \cdot \sigma_{in1} = 0.0021 \quad (12)$$

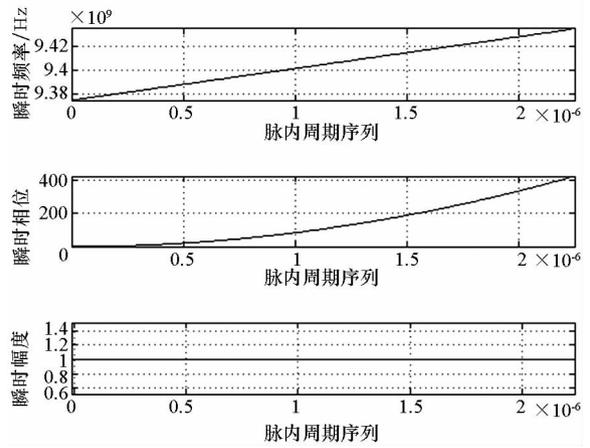


图 4 机载雷达脉内信号的瞬时参数

Fig. 4 Instantaneous parameters of airborne radar signal

3.2 极化域和能量域射频隐身因子计算

根据 1.1 和 1.2 节的分析,对辐射源和信号极化域和能量域进行仿真计算,图 5 所示为两种雷达信号的极化状态,周期分别为 3 s 和 5 s。

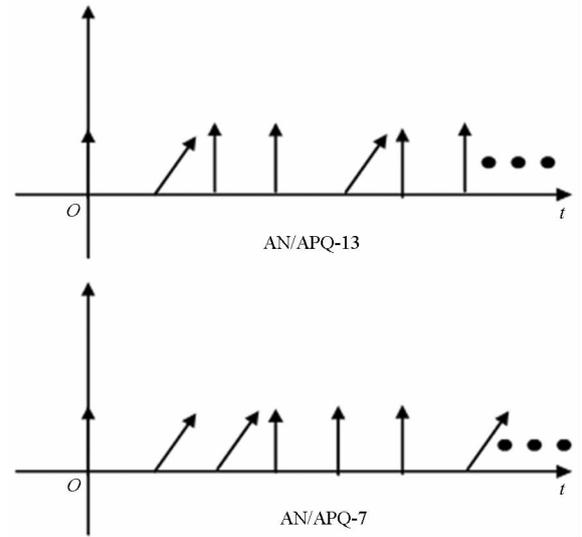


图 5 机载雷达辐射信号极化态的变化示意图

Fig. 5 Polarization state change of airborne radar signal

依据极化域射频隐身性能评估指标计算方法,利用式(1)计算两个雷达信号的极化域射频隐身评估指标为:

$$\sigma_p = 0.2048, \sigma_{1p} = 0.1257$$

两种雷达信号的单一周期能量随时间的变化状态如图 6 所示,则有 $T_e = 4, T_{1e} = 3$ 。根据能量域射频隐身性能评估指标计算式(2), 则有:

$$\sigma_e = 0.9981, \sigma_{1e} = 0.9988$$

综上所述:由式(7)得两种机载雷达的射频隐身指标为:

$$\sigma_{\text{sig}} = \sigma_p \cdot \sigma_e \cdot \sigma_s = 0.000\ 343\ 41$$

$$\sigma_{1\text{sig}} = \sigma_{1p} \cdot \sigma_{1e} \cdot \sigma_{1s} = 0.000\ 263\ 65$$

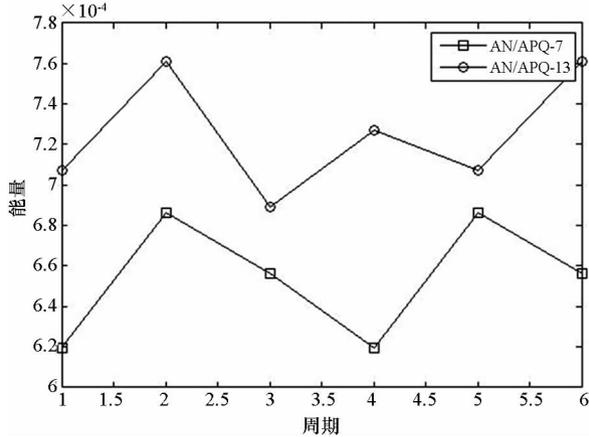


图6 机载雷达的单周期能量随时间变化

Fig. 6 Single period of airborne radar energy change

结果表明,根据本文提出的评估方法 AN/APQ-7 雷达的射频隐身性能要优于 AN/APQ-13 雷达。由以上评估过程可以得出:对机载航电系统辐射源信号进行射频隐身性能评估的公式并不唯一,设定的指标计算公式不同得出的数值不同。但是,采用相同的评估标准对不同机载航电系统进行评估时并不会影响其评估结果,仍然能准确评估出机载航电系统射频隐身性能的优劣。

4 结论

本文基于机载航电系统辐射源开展了信号的极化域、能量域和波形域射频隐身性能评估研究,构建基于自身辐射源特征的评估体系。相比较传统方法,不需要考虑敌方截获接收机的性能,天气和地形因素,仅需设定辐射源的任务状态,基于自身信号的具体特征是对机载航电系统辐射源射频隐身能力的一种本质描述,具有较强的通用性和实用性。通过对两种机载雷达信号进行仿真对比,实现了射频隐身性能评估,构建了系统性射频隐身性能评估体系。这对机载航电设备的选取和战术使用具有一定的指导意义。

参考文献 (References)

[1] Lynch D L, Jr. Introduction to RF stealth [M]. Raleigh, NC, USA: Science Technology Publishing Incorporation, 2004.

[2] Yang H B, Zhou J J, Wang F. Design and analysis of Costas/PSK RF stealth signal waveform [C]//Proceedings of IEEE CIE International Conference on Radar, 2011: 1247-1250.

[3] 李寰宇, 查宇飞, 李浩, 等. 联合截获威胁下的雷达射频隐身目标搜索算法[J]. 航空学报, 2015, 36(6): 1953-1963.

LI Huanyu, ZHA Yufei, LI Hao, et al. Radar search algorithm based on RF stealth in the case of joint intercepted threats[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(6): 1953-1963. (in Chinese)

[4] 谢桂辉, 田茂, 王正海, 等. 射频隐身数据链的通信波形参数优化建模[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(4): 116-122.

XIE Guihui, TIAN Mao, WANG Zhenghai, et al. An optimization model for communication waveform parameters of radio frequency stealth datalink[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(4): 116-122. (in Chinese)

[5] 杨少委, 程婷, 何子述, 等. MIMO 雷达搜索模式下的射频隐身算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(5): 1017-1022.

YANG Shaowei, CHENG Ting, HE Zishu, et al. Algorithm of radio frequency steal for MIMO radar in searching mode[J]. Journal of Electronics Information Technology, 2014, 36(5): 1017-1022. (in Chinese)

[6] 李寰宇, 柏鹏, 王谦喆, 等. 天线波束对飞机射频隐身性能的影响分析[J]. 现代防御技术, 2012, 40(4): 128-133, 137.

LI Huanyu, BAI Peng, WANG Qianzhe, et al. Influence of antenna beam on radiofrequency stealth[J]. Modern Defence Technology, 2012, 40(4): 128-133, 137. (in Chinese)

[7] Pace P E. Detecting and classifying low probability of intercept radar[M]. London, UK: Artech House Inc, 2004: 19-24, 30-33.

[8] Wang F, Sellathurai M, Liu W, et al. Security information factor based airborne radar RF stealth[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015(2): 258-266.

[9] Yang H B, Wang J, Zhou J J. Design of noise modulation continuous wave RF stealth radar signal waveform [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing, 2011: 1760-1763.

[10] Dillard G M, Reuter M, Zeidler J, et al. Cyclic code shift keying: a low probability of intercept communication technique [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 786-789.

[11] 杨宇晓, 汪飞, 周建江, 等. 跳频周期和跳频间隔的最大条件熵射频隐身设计方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 841-847.

YANG Yuxiao, WANG Fei, ZHOU Jianjiang, et al. RF stealth method for hopping cycle and hopping interval based on conditional maximum entropy[J]. Journal of Electronics Information Technology, 2015, 37(4): 841-847. (in Chinese)

[12] 吴思东, 朱明, 付克昌, 等. 基于多元集对分析的辐射源信号熵特征评价[J]. 电路与系统学报, 2013, 18(2): 298-304, 320.

WU Sidong, ZHU Ming, FU Kechang, et al. Entropy feature evaluation of radar emitter signals based on SPA[J]. Journal of Circuits and Systems, 2013, 18(2): 298-304, 320. (in Chinese)

[13] Skolnik M I. Radar manual[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000.