

文章编号: 2095-4980(2020)01-0061-05

低截获通信波形设计

刘春玲, 苏文字, 杨 阳

(大连大学 信息工程学院, 辽宁 大连 116622)

摘 要: 在现代战争中, 飞行器之间通信的隐蔽性是飞行器完成打击、侦查等任务的关键因素。如何提高系统的抗截获性能成为军用通信系统设计的关键问题。研究了低截获系统相关理论在通信波形设计方面的应用, 提出用“截获距离”和“低截获品质因数”来衡量通信系统的抗截获性能; 分析了影响系统抗截获性能指标的因素和提升系统抗截获性能的途径。以此为基础研究了不同调制解调方式、信道编码方式以及跳频参数对通信系统抗截获性能的影响; 建立了抗截获通信系统仿真模型, 分析了该系统的截获距离、品质因数和误码率; 最终得到截获距离小于通信距离的通信系统。仿真结果验证了方法的有效性, 为低截获通信系统的设计提供了参考。

关键词: 通信波形; 低截获; 调制解调; 信道编码; 跳频

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018354

Waveform design of Low Probability of Interception communication

LIU Chunling, SU Wenyu, YANG Yang

(College of Information Engineering, DaLian University, Dalian Liaoning 116622, China)

Abstract: In modern wars, the concealment of communication between aircrafts is the key factor for aircraft to complete the combat, reconnaissance and other tasks. How to improve the anti-interception performance of the system becomes the key problem of the military communication system design. The application of the theory of Low Probability of Interception(LPI) system in communication waveform design is studied. The anti-interception performance of communication waveform is measured by intercepting distance and the LPI quality factor. The factors that affect the anti-interception performance of the system and the methods to improve it are analyzed. On this basis, the effects of different modulation and demodulation modes, channel coding modes and frequency hopping parameters on the anti-interception performance of communication systems are investigated. The simulation model of anti-interception communication system is established, and the interception distance, quality factor and error bit rate of the system are simulated. Finally, a communication system with interception distance less than communication distance is obtained. The validity of the method is verified, and it provides a reference for the design of LPI system.

Keywords: communication waveform; low intercept; modulation and demodulation; channel coding; frequency hopping

在电子对抗环境中, 拥有良好抗截获性能的通信系统可以大大增加敌方获取我方情报的难度和代价, 对保证我方通信质量, 延长飞行器生存时间有重要意义。

目前, 我国对于低截获系统的研究主要集中于低截获雷达系统方面, 对于低截获通信系统方面的研究还比较缺乏。文献[1-2]主要分析雷达波形和隐身性能之间的关系; 文献[3]在雷达系统中从截获角度出发分析编码跳频的性能; 文献[4-6]关注的是雷达系统中调制解调和信道编码方式的改进; 文献[7]给出了截获雷达波形的分类方式; 文献[8-9]则在此基础上提出了不同的信号处理方式。

本文将低截获系统相关理论运用于通信波形的设计中, 用“截获距离”和“低截获品质因数”来衡量通

收稿日期: 2018-11-22; 修回日期: 2019-01-01

基金项目: 装备发展部领域基金资助项目(61403110308; 61405180402)

作者简介: 刘春玲(1971-), 女, 教授, 主要研究方向为卫星通信、信号处理等。email:liucl_sy@163.com

信波形的抗截获性能, 具体分析了影响低截获性能指标的因素, 提出 2 条提高通信系统抗截获性能的方案, 并以此为基础分析了不同调制解调方式、信道编码方式以及跳频参数对于低截获性能指标的影响。

1 通信系统模型

通信系统场景模型如图 1 所示, 通信发射机和通信接收机之间进行通信, 其通信距离用 R_C 表示。截获机与通信发射机之间的距离用 R_I 表示。

设计低截获信号波形, 是为了使通信接收机在和截获机的对抗中取得优势, 即截获机比接收机需更加靠近发射机才能有效获取发射机的通信信号, 使截获机更加容易被侦测和打击, 增大了敌方获取我方情报的难度和代价。

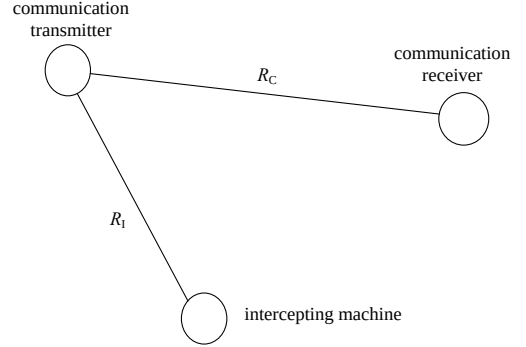


Fig.1 Communication system model
图 1 通信系统模型

2 低截获性能的评估方法

截获距离是评估系统截获性能的指标, 定义为^[10]:

$$R_I^2 = \frac{P_T G_{TI} G_I G_{IP} L_I}{(4\pi / \lambda)^2 P_T} \quad (1)$$

式中: R_I 为截获距离; P_T 为通信辐射功率; G_{TI} 为通信发射机天线在截获机方向上的增益; G_I 为截获机天线增益; λ 为发射机波长; L_I 为发射机与截获机之间的损耗; G_{IP} 为截获机处理器对应增益。

发射机实际发出的功率受系统调制解调方式和信道编码方式的影响, 在要求误码率为 10^{-6} 的情况下, 系统解码和解调所需求的信噪比为 E_b/N_0 , 则:

$$P_T = (E_b / N_0) N_0 R_b \quad (2)$$

式中: N_0 为噪声功率谱密度; R_b 为通信系统的速率。系统发射的功率要尽可能小, 才能尽可能地缩短截获距离。

假设给定发射功率与发射机—截获机距离 R_I 的信标方程为:

$$P_I = J_I \frac{P_T G_{TI}}{R_I^2} \quad (3)$$

式中: P_I 为截获机在距离 R_I 处接收到的功率; J_I 为截获机灵敏度, 该值取决于截获机的任务模式, 定义为:

$$J_I = \frac{\lambda^2 G_{IP} G_I L_I}{(4\pi)^2} \Rightarrow 2 \times 10^{-3} \quad (4)$$

将式(2)代入式(3), 截获机进行有效截获的最小距离为:

$$R_I = \sqrt{J_I \frac{(E_b / N_0) N_0 R_b G_{TI}}{P_I}} \quad (5)$$

定义

$$P_I = SNR_I \times n_I = k_B \cdot T_0 \cdot NF_I \cdot B_I \cdot R_{SN,I} \quad (6)$$

式中: SNR_I 为截获机所要求的峰值信号功率与均方根噪声功率之比; k_B 为玻尔兹曼常数; T_0 为 290 K 基准温度; NF_I 为截获机噪声功率系数; B_I 为截获机信道噪声带宽。

将式(6)代入式(5), 则截获距离最终可表示为:

$$R_I = \sqrt{J_I \frac{(E_b / N_0) N_0 R_b G_{TI}}{k_B \cdot T_0 \cdot NF_I \cdot B_I \cdot R_{SN,I}}} \quad (7)$$

低截获品质因数(Q_{LPI})由施里海尔(Schleher)截获因子推广而来, 其定义为^[11-12]:

$$Q_{LPI} = 20 \log R_C / R_I \quad (8)$$

低截获品质因数越小, 则信号越不容易被截获, 系统的抗截获性能越好。

用低截获性能指标衡量通信系统抗截获性能的优势在于: 截获距离可以为飞行器的部署提供直接参考, 而低截获品质因数可以直观地反映系统的抗截获性能。

低截获波形设计的目的是为了获得尽可能小的截获距离和尽可能大的品质因数。为达到该目的, 可以采取以下 2 种方法:

1) 需要在满足接收机要求的发射功率情况下, 选取合适的信道编码方案和调制解调方案, 以获得尽可能小的信噪比。

2) 由于截获机被要求覆盖整个跳频段, 因此受噪声带宽限制, 采用跳频方案扩展发射机发射的信号带宽。

3 低截获波形设计方案

低截获系统的整体系统框图如图 2 所示。信源发出的信号经过信道编码和调制之后和跳频载波发生器产生的跳频载波相乘, 达到扩展频谱的目的^[13-14]。经过信道之后, 在接收端对信号依次进行解跳、解调和译码过程。通信系统模型基本参数见表 1。

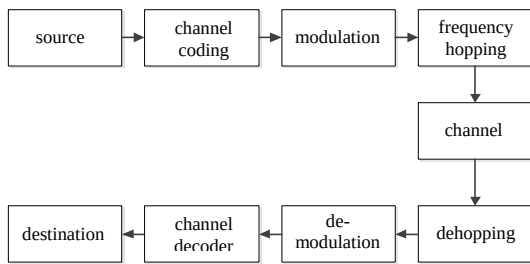


Fig.2 Block diagram of low intercepted communication system
图 2 低截获通信系统框图

表 1 通信系统仿真参数

Table1 Communication system simulation parameters

system parameter	value
system communication rate/kbps	248
interceptor sensitivity/m ²	2×10^{-3}
sensitivity/(W·m ⁻²)	10^{-8}
antenna gain of communication transmitting antenna in	5
interceptor direction/dB	20
transmitter antenna gain/dB	20
noise power factor of interceptor ratio of	10
peak signal power to RMS/dB	16
noise power required by interceptor/dB	16
power spectrum density of unilateral noise/(W·Hz ⁻³)	3×10^{-8}
communication distance/km	10

3.1 调制解调方式对低截获性能的影响

通过选取合适的调制解调方式以获得尽可能小的信噪比, 不同阶 PSK 调制方式和不同阶 QAM 调制方式下信噪比—误码率曲线如图 3~图 4 所示。在给定误码率为 10^{-6} 条件下, 结合表 1 给出的模型基本参数, 利用式(7)~(8)可以分别计算不同调制解调方式所需的信噪比对应的截获距离和低截获品质因数, 结果见表 2。

由表 2 可以看出, 在误码率为 10^{-6} 情况下, QPSK 调制方式所需的信噪比最低, 为 13.7 dB, 对应截获距离为 104.78 km, 低截获品质因数为 -20.405, 选择 QPSK 调制解调方式可以提高系统的抗截获性能。

表 2 不同调制解调方式的抗截获性能

Table2 Anti interception performance of different modulation and demodulation modes

modulation mode	required SNR /dB	interception distance/km	QLPI
QPSK	13.7	104.78	-20.405 0
8PSK	18.9	190.67	-25.605 2
16PSK	24.7	371.76	-31.405 0
32PSK	31.4	804.01	-38.105 0
16QAM	21.2	248.46	-27.905 0
32QAM	24.2	350.96	-30.905 0
64QAM	27.4	507.29	-34.105 0
128QAM	30.3	708.37	-37.005 0

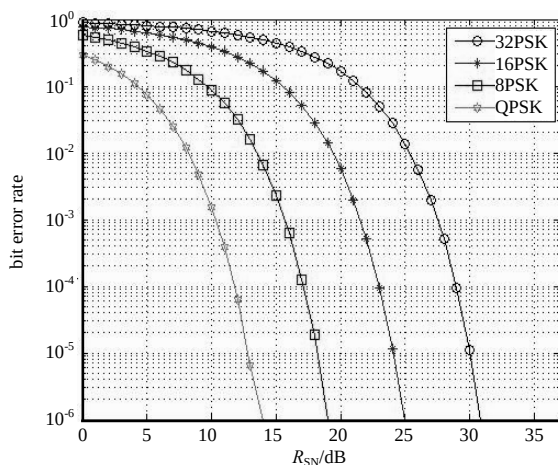


Fig.3 M-PSK signal-to-noise ratio-bit error rate curve

图 3 M-PSK 信噪比—误码率曲线

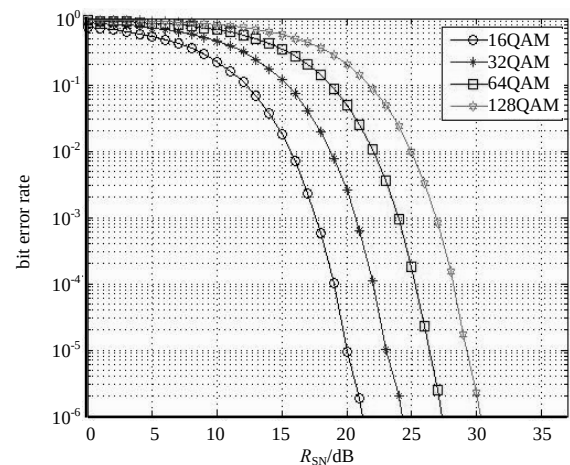


Fig.4 M-QAM signal-to-noise ratio-bit error rate curve

图 4 M-QAM 信噪比—误码率曲线

3.2 信道编码方式对低截获性能的影响

加入信道编码模块, 可以使系统获得较高的信道编码增益, 从而进一步降低系统所需的信噪比, 达到缩小截获距离、增大品质因数的目的^[15]。由上文可知, 采用 QPSK 调制方式可以获得较好的低截获性能, 调制解调

方式为 QPSK 时,系统在 RS 编码、BCH 编码和 LDPC 编码方式下的信噪比—误码率曲线如图 5 所示。

目标误码率为 10^{-6} ,结合表 1 给出的模型基本参数,利用式(7)~(8)可以分别计算不同信道编码方式所需的信噪比对应的截获距离和低截获品质因数,结果见表 3。

由仿真可知,在给定信噪比为 10^{-6} 情况下,LDPC 相对于 RS 有 8.00 dB 的优势,相较于 BCH 码有 9.82 dB 的优势,对应的截获距离为 23.84 km,低截获品质因数为 -7.545 2。因此,采用 LDPC 编码系统可以获得较好的抗截获性能。

3.3 跳频方案设计

由 3.1~3.2 节的结论可知,选择 QPSK 作为调制解调方案,LDPC 作为信道编码方案可以获得较好的抗截获性能。为进一步优化抗截获性能指标,加入跳频方案,扩展信号频谱,增大截获机搜索的频带宽度。系统的带宽由跳频载波的跳频间隔和跳频点数决定,不同跳频点数下跳频间隔和截获距离的关系如图 6 所示,对应的低截获品质因数如图 7 所示。

图 6 中给出了 10 km 参考线,跳频方案的设计应尽可能使得曲线向下靠近参考线或低于 10 km 参考线。由图可知,随着跳频间隔的增加,系统跳频点数越高,越有利于系统获得更小的截获距离。

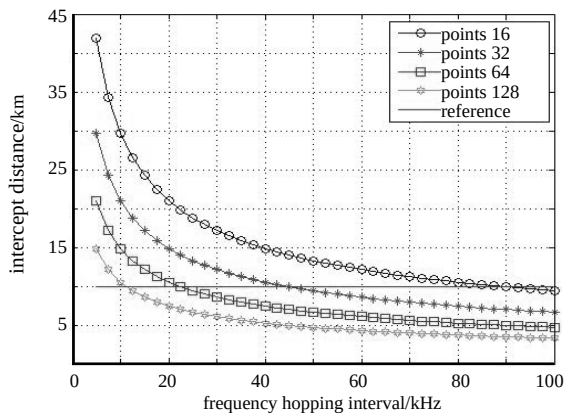


Fig.6 Relationship between the different number of frequency hopping points and the intercept distance

图 6 不同跳频点数与截获距离的关系

图 7 中给出了品质因数为 0 的参考线,跳频方案的设计应尽可能使得曲线向上靠近 0 参考线或高于参考线。由图 7 可知,随着跳频间隔的增加,系统跳频点数越高,越有利于系统获得更大的低截获品质因数。

本文采用的跳频点数为 128 点,间隔为 15 kHz,信号带宽为 1.92 MHz,系统在 QPSK 调制、LDPC 信道编码方式下信噪比—误码率曲线如图 8 所示。由图 8 可知,在误码率为 10^{-6} 时,所需信噪比为 0.84 dB,将对应参数代入式(7)~(8),得到截获距离为 8.57 km,低截获品质因数为 1.343 3。

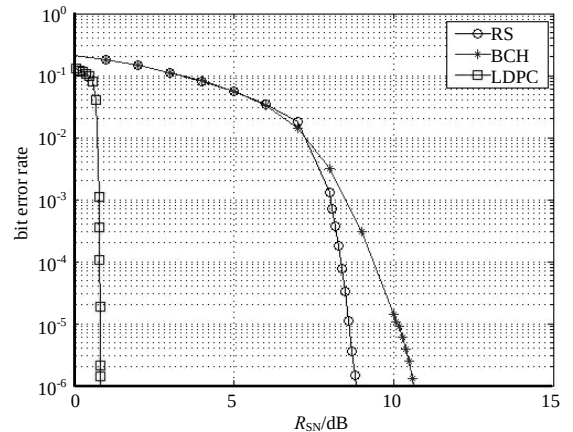


Fig.5 RS,BCH and LDPC SNR ratio-bit error rate curve
图 5 RS,BCH 和 LDPC 信噪比—误码率曲线

表 3 不同编码方式的抗截获性能
Table3 Anti interception performance of different coding methods

coding mode	required SNR /dB	interception distance/km	QLPI
BCH	10.65	73.75	-17.355 0
RS	8.83	59.81	-15.535 0
LDPC	0.84	23.84	-7.545 2

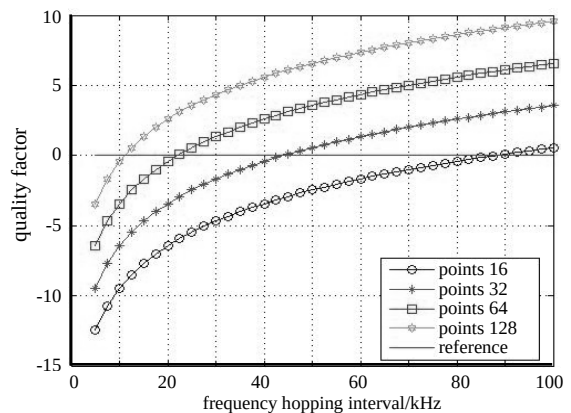


Fig.7 Corresponding change of quality factor

图 7 对应品质因数变化

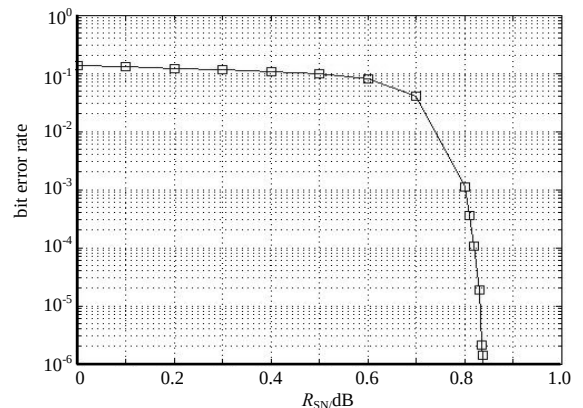


Fig.8 SNR of the whole system-bit error rate curve

图 8 整体系统信噪比—误码率曲线

4 结论

本文将低截获系统相关理论用于通信波形的设计中,用“截获距离”和“品质因数”来衡量通信波形的抗截获性能。对比了不同的调制解调方式和信道编码方式,得出采用 QPSK 调制、LDPC 编码系统抗截获性能更高的结论。仿真了跳频点数和跳频间隔与截获距离和品质因数的关系,跳频点数越多,间隔越大,越有利于提升系统的抗截获性能。最后通过搭建低截获通信系统,给出了系统信噪比与误码率的关系,获得了较为理想的低截获性能参数,为低截获通信系统设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 杨红兵,周建江,汪飞,等. 飞机射频隐身表征参量及其影响因素分析[J]. 航空学报, 2010,31(10):2040–2045. (YANG Hongbing,ZHOU Jianjiang,WANG Fei,et al. Characterization parameters of warplane RF stealth and analysis of its affecting factors[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010,31(10):2040–2045.)
- [2] 侯小林,羊彦,高健健,等. 雷达低截获概率信号及验证方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2012,39(4):184–190. (HOU Xiaolin,YANG Yan,GAO Jianjian,et al. Methods for testing the low probability of interception performance of radar signals[J]. Journal of Xidian University(Natural Science Edition), 2012,39(4):184–190.)
- [3] 黄美秀,陈祝明,段锐,等. 编码跳频信号的低截获性能分析[J]. 现代雷达, 2011,33(10):33–37. (HUANG Meixiu,CHEN Zhuming,DUAN Rui,et al. LPI performance analysis of coded frequency-hopping signal[J]. Modern Radar, 2011,33(10):33–37.)
- [4] 郭贵虎,文贻军,戴天. 一种新型低截获 FSK/PSK 雷达信号分析[J]. 电视技术, 2009,49(8):49–53. (GUO Guihu,WEN Yijun,DAI Tian. Analysis of a new FSK/PSK radar signal with Low Probability of Interception[J]. Telecommunication Engineering, 2009,49(8):49–53.)
- [5] 彭智慧,林明. 一种新型组合低截获雷达波形研究[J]. 计算机仿真, 2014,31(3):46–50. (PENG Zhihui,LIN Ming. Analysis of hybrid radar waveform with LPI[J]. Computer Simulation, 2014,31(3):46–50.)
- [6] 李英祥,周先敏. 一种具有 LPI 特性的雷达信号—新的 FSK/PSK 信号[J]. 信号处理, 2002,18(2):177–179. (LI Yingxiang,ZHOU Xianmin. A new FSK/PSK radar signal characterized with LPI[J]. Signal Processing, 2002,18(2):177–179.)
- [7] KISHORE T,RAO K D. Automatic intrapulse modulation classification of advanced LPI radar waveforms[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017,53(2):901–914.
- [8] GULUM T,YASIN ERDOGAN A,ATA L D,et al. Enhanced LPI waveform representation by ambiguity-domain elliptical Gaussian filtering[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017,53(2):762–777.
- [9] SHYAMSUNDER M,SUBBARAO K,REGIMANU B,et al. Estimation of modulation parameters for LPI radar using quadrature mirror filter bank[C]// 2016 IEEE UPCon. Varanasi,India:IEEE, 2016:239–244.
- [10] LYNCH David. 射频隐身导论[M]. 沈玉芳,译. 西安:西北工业大学出版社, 2009. (LYNCH David. Introduction to RF stealth[M]. Translated by SHEN Yufang. Xi'an:Northwest University of Technology Press, 2009.)
- [11] GUTMAN L L,PRESCOTT G E. System quality factors for LPI communications[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1989,4(12):475–478.
- [12] 柳文明,韩树平,李厚全,等. 基于截获因子的直序扩频水声通信隐蔽性能分析[J]. 南京大学学报(自然科学), 2017,53(4):654–660. (LIU Wenming,HAN Shuping,LI Houquan,et al. Covert performance analysis of direct-sequence spread-spectrum underwater acoustic communication based on interception factor[J]. Journal of Nanjing University(Natural Science Edition), 2017,53(4):654–660.)
- [13] 王向鸿,赵海涛,关晓东. 跳频扩频系统的 Matlab 模拟仿真实现[J]. 现代电子技术, 2010,33(19):74–75,80. (WANG Xianghong,ZHAO Haitao,GUAN Xiaodong. Implementation of Matlab simulation for frequency-hopping spread spectrum system[J]. Modern Electronics Technique, 2010,33(19):74–75,80.)
- [14] LIU Kefei,YANG Dongkai,WU Jiang. Simulink implementation of frequency-hopping communication system[J]. Journal of System Simulation, 2009,21(24):7969–7973.
- [15] 闫峥,王梦源. 空间通信中调制与编码热点技术探析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(5):736–739. (YAN Zheng,WANG Mengyuan. Hot technology analysis of modulation and coding in space communication[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(5):736–739.)