

文章编号: 1001-893X(2012)08-1232-07

共址干扰下的车载跳频电台误码率计算与分析^{*}

全厚德¹, 赵 波², 尹中秋³, 何 丰²

(1. 军械工程学院 信息工程系, 石家庄 050003; 2. 总参信息化部驻石家庄地区军事代表室, 石家庄 050003;
3. 解放军驻一二四厂军事代表室, 郑州 450062)

摘 要:针对车载 HF 跳频电台的共址干扰问题进行了较为全面和深入的研究。首先对共址平台和天线耦合度进行了分析, 并通过建立有线实验平台和理论模型, 深入研究了功率、频率、误码率等参数之间的相互关系。在此基础上, 通过分析 HF 组网的约束条件, 建立了综合共址干扰、跳频、组网等因素的误码率计算模型。实例分析表明, 模型为评估系统性能和配置电台工作参数提供了理论依据。

关键词:车载跳频电台; 共址干扰; 耦合度; 误码率计算; 系统性能

中图分类号: TN914.41 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.08.002

Computation and Analysis of Vehicular Frequency-Hopping Radio BER under Cosite Interference

QUAN Hou-de¹, ZHAO Bo¹, YIN Zhong-qiu², HE Feng¹

(1. Information Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;
2. Military Representative Office of General Staff Headquarters Informationization Department in Shijiazhuang,
Shijiazhuang 050003, China; 3. Military Representative Office in 124 Factory, Zhengzhou 450062, China)

Abstract: For the cosite interference (CI) problem of vehicular HF frequency-hopping (FH) radio, a comprehensive and in-depth research is conducted. Firstly, the CI platform and antenna coupling are analysed. Through establishing the wired experiment platform and theoretical model, the relationships between the power, frequency, BER and other parameters are investigated. Based on these studies, through analysing the constraint conditions of HF FH networking, the BER computational model which includes CI, FH, networking and other factors is established. The example analysis shows that the model is the theoretical basis in evaluating system performance and arranging parameters of radios.

Key words: vehicular FH radio; co-site interference; coupling; BER computation; system performance

1 引 言

随着电磁环境的日益复杂, 车载、舰载、机载通信系统一般同时装配多部短波、超短波跳频电台, 当这些电台同时在一狭小区域内工作时, 由于天线间距很近, 发射机和邻近接收机的收发电平相差很大

(可超过 100 dB), 会产生严重的共址干扰, 特别是多部电台同时跳频工作 (参与不同的跳频群网) 时, 会导致更为严重的网间及网内干扰, 导致接收机阻塞或减敏^[1]。共址干扰的定量分析是复杂通信系统工作的重要组成部分, 它一方面为现有通信系统跳频组网性能的评估, 以及跳频电台工作参数的分配提供了理论依据^[2], 另一方面也为未来通信系统的设

^{*} 收稿日期: 2012-04-24; 修回日期: 2012-06-04

基金资助: 总装备部科研项目

Fund Assistance: Research Project of General Equipment Department

计、电台的配置提供了有力的指导。

针对共址干扰下的跳频电台组网问题,国内外缺乏较为系统、全面的研究,仅仅侧重某一方面,例如:共址环境中的天线耦合度预测、天线布局优化、共址干扰抑制和消除,设计低碰撞的跳频序列,以及对跳频碰撞模型的研究^[2-6]。文献[7]实现了 3 种干扰条件下的误码率计算,其模型反映了共址干扰,但只适合于两部电台间一对一的干扰模式。文献[8]提出了干扰概率的概念,将定频干扰带宽引入干扰概率的计算,但模型只是将干扰带宽与工作带宽相比,无法考虑频表分配对干扰概率的影响。文献[9]在干扰概率基础上,通过与 VHF 跳频方式相结合,对跳频组网性能进行了分析和优化,但干扰条件的设定仅依赖于频率间距,缺乏对电台实际性能的研究,而且干扰概率无法代替数字通信中的误码率指标。已有文献针对共址电台开展了很多研究,但模型相对简单,既缺乏系统的实验作为支撑,也没有对天线、电台、跳频等因素进行全面、深入的分析与研究。

本文以车载 HF 电台为对象,在大量实验和理论分析基础上,建立了定频模式下的共址干扰分析模型。在此基础上,结合 HF 跳频组网方式,提出了跳频系统的误码率计算方法,深入分析了共址条件下,影响跳频组网性能的主要因素,为通信系统配置和设计奠定了基础。

2 HF 电台共址干扰分析

2.1 共址工作平台

在车载通信系统中,共址工作的无线电台有图 1 中的两种情形。在图 1(a)中,两部无线电台在同一车载平台上,天线之间的间距固定,一部作为共址接收机与远端的发射机正常通信,一部作为共址的干扰发射机。在图 1(b)中,两部共址无线电台在间距为 dx 的两辆车载平台上,天线间距 dx 可变。

如图 1 所示,共址工作的无线电台距离很近,干扰机会对邻近的接收机产生较强的干扰信号,从而导致接收机工作性能下降。在数字通信系统中,误码率(BER)是衡量数据传输正确性的重要指标,这里以 BER 为目标,对共址干扰中的主要影响因素进行定量分析。

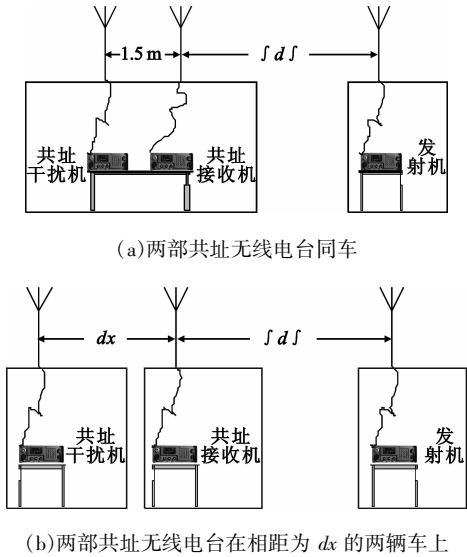


图 1 共址干扰下的无线电台
Fig.1 Radios under CI

2.2 主要影响因素

耦合度是判断天线间干扰程度和电台间射频传输损耗的重要参数,同时也是计算共址 BER 的前提条件。针对图 1 中的两种情形,文献[10-13]中已经进行了研究。其中,图 1(a)中的情形可以采用实验的方式得到近场区(菲涅耳区域)的天线耦合度,图 1(b)的情形则采用自由空间传播方式计算功率耦合度。

图 2 是针对 HF 电台的两种不同天线,在图 1(a)所示环境中,得到的不同工作频点下耦合度的统计均值曲线。

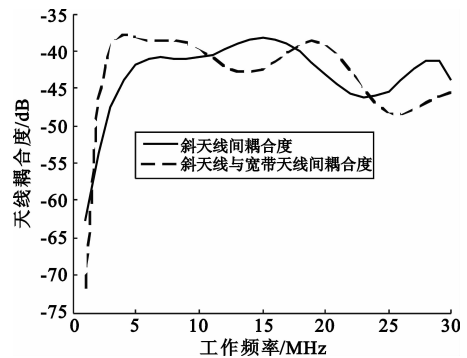


图 2 HF 电台耦合度统计均值曲线
Fig.2 Coupling statistical curve of HF radio

假设共址干扰机发射功率为 P_s ,正常通信电台在接收机处的信号大小为 P_r ,功率耦合度为 C ,则干扰电台在接收机端的干扰功率为

$$P_i = P_s + C \tag{1}$$

通常 P_r 基本恒定,因此,共址干扰的影响主要

决定于共址工作电台之间的频率间隔 Δf , 以及干扰与信号功率之差:

$$\Delta p = P_i - P_r \tag{2}$$

同时, 接收电台的频率选择性、敏感度门限等, 以及环境噪声, 也会对 BER 指标产生影响。因此, 共址干扰的主要影响因素有: 与空间域相关的耦合度, 与能量域相关的电台收发特性和环境噪声, 以及与频率域相关的频率间隔。

2.3 实验平台和理论模型

为了深入分析共址干扰对 BER 的影响, 在定频模式下, 分别从实验和理论两方面出发对 BER、 Δf 和 Δp 等参数之间的关系进行了研究, 从而为跳频组网分析奠定基础。

文献[10]建立了图 3 所示的有线实验平台, 通过改变共址电台频率间隔、信号、干扰功率, 对状态下的误码率指标进行了测试, 从而对 BER、 Δf 和 Δp 三者之间的关系进行了深入的分析与研究。

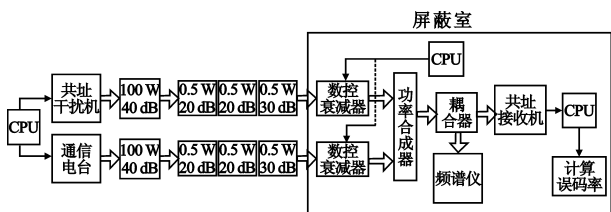


图 3 共址干扰下的误码率测试平台
Fig.3 BER test platform under CI

采用有线连接方式的优点是所有指标都是可控、可调节的, 实验具有真实性、可重复性。平台主要由电台、固定衰减器、数控衰减器、功率合成器、耦合器等构成。为了防止功率泄露影响测试结果, 将共址接收机置于电磁屏蔽室内, 其他电台置于屏蔽室外, 分别作为通信电台和共址干扰电台。

理论方面则按照图 4 所示模型, 在文献[12-13]中对 BER 性能进行了深入研究。

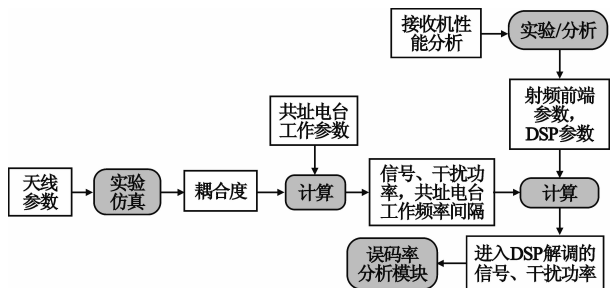


图 4 定频模式下的共址干扰分析模型
Fig.4 CI analysis model of fixed frequency model

2.4 共址安全带宽分析

为了衡量共址干扰信号的有效覆盖范围, 引入共址安全带宽的概念来分析干扰对频率域的影响。设发射机的发射频率为 f_T , 接收机的调谐频率 f_R , 在电磁干扰的临界情况下, 发射机和接收机之间的最小频率间隔为

$$\Delta f_{\min} = |f_T - f_R| \tag{3}$$

如果 $f_T > f_R$, 定义 $\Delta f_{\min}$ 为共址干扰的下限安全带宽, 即接收电台为了避免干扰需要向下偏离发射中心频率的间隔; 相反, 则定义为共址干扰的上限安全带宽。

以 HF 电台为例, 依据图 3 中的平台和图 4 中的模型对共址干扰下的重要指标进行研究。HF 数据 BER 容限一般为 1×10^{-4} [14], 因此, 这里以 1×10^{-4} 作为临界状态, 给出了 Δp 与 Δf 之间的理论和实验拟合曲线, 如图 5 所示。

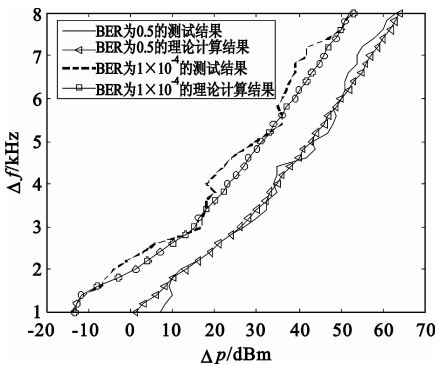


图 5 Δp 与 Δf 的关系曲线
Fig.5 Relational curve between Δp and Δf

从图 5 可以看出, 当 BER 一定时, 随着 Δp 的增加, 所要求的 Δf 也逐渐增加。当 Δp 确定时, 通过绘制 BER 的拟合曲线, 可得到所要求的最低频率间隔 $\Delta f_{\min}$, 即共址安全带宽。要保持 BER 在指定容限之下, 工作频率必须大于 $\Delta f_{\min}$; 反之, 当频率间隔小于 $\Delta f_{\min}$ 时, 认为工作频点被干扰台覆盖, 处于干扰有效区间。

3 误码率计算模型

3.1 跳频组网分析条件

(1) 假设有 L 辆通信车在同一地点展开工作, 每辆车配有 n_L 部 HF 电台, 单车上的每部电台分别与远端电台组成 n_L 个跳频通信网进行通信, 同时存

在同车和车际间共址干扰;

(2)HF 电台采用天波传播,由于电离层的时变特性,存在所谓的频率“窗口现象”,导致不同方向通信的频率带宽一般在 50 ~ 500 kHz 和 1 MHz 范围^[14],所以在不同的环境和时段下,HF 通信一般采用窄带跳频;

(3)跳频序列由伪码发生器随机产生,跳频间隔为 ΔF ,跳频频表的频率点数为 N ,则在每一瞬时,电台 i 落在 N 个跳频点上的第 j 个频点的事件呈等概率分布,受窄带跳频的限制,共址工作的各电台都在同样 N 个跳频点上工作,跳频状态相互独立;

(4)若系统内共有 n 部电台,而跳频系统在每一工作瞬时是否受到干扰是一确定事件,可按定频模式进行分析,相应地引入瞬时干扰判据;

(5)通过实验和理论分析,可以在已知耦合度、干扰功率、信号功率、BER 容限等参数的基础上,确定共址安全带宽 $\Delta f_{\min}$,则瞬时干扰判据为:在某时刻 t ,若某受试台工作于频点 f_i ,而干扰台工作于频点 f_j 时,若 $|f_i - f_j| < \Delta f_{\min}$,则受试台在该瞬时被干扰。

3.2 误码率计算

跳频系统受干扰时,误码率可以近似为^[14]

$$P_e = 0.5 \frac{J}{N} \quad (4)$$

其中, J 为受干扰频点数, N 为跳频点数目,这里以第 i 部电台为对象,将其看作受试台,其余 $n-1$ 部看作干扰台,计算受试台 i 的受扰频点 J 。

在某一时刻, $n-1$ 部干扰台对应的瞬时跳频点分别为 $\{f_{j_1}, f_{j_2}, \dots, f_{j_{n-1}}\}$,每一部干扰台对应的频点覆盖范围 $\Delta f_{\min}$ 由公式(1)~(3)决定。公式(1)中的耦合度 C ,对应图 1 有下面两种计算方法:

$$C = W(f_j) \quad (5)$$

或者

$$C = 32.45 + 20 \lg(dx) + 20 \lg f_j - G_t - G_r \quad (6)$$

式中, W 为近场耦合度的拟合曲线, dx 为电台间距, f_j 为瞬时工作频率, G_t 、 G_r 分别为天线的发射和接收增益。

此时,干扰台 k 工作在频点 f_k ,对应频点覆盖范围为 $\Delta f_{\min}^k$,干扰台 k 对邻近工作频点的干扰覆盖范围为

$$Q_k = \left\lceil \frac{\Delta f_{\min}^k}{\Delta F} \right\rceil \quad (7)$$

为了避免共址干扰,这里采用频点数目向上取

整的方式。因此,干扰台 k 的有效干扰频点集合为 $G_k = \{f_{j_k} - Q_k \Delta F, \dots, f_{j_k} - \Delta F, f_{j_k}, f_{j_k} + \Delta F, \dots, f_{j_k} + Q_k \Delta F\}$ (8)

设窄带跳频的所有的工作频点为

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_N\} \quad (9)$$

因此,干扰台 k 对受试台 i 在此刻的干扰频点为

$$J_{i,k} = G_k \cap F \quad (10)$$

即,对集合 G_k 和 F 求交集,判断干扰台 k 在此刻占用了多少有效工作频点。

依据上述分析条件,受试台 i 在任意一个时刻,受到干扰的频点集合为

$$J_i = \bigcup_{k=1, k \neq i}^n J_{i,k} = \{J_{i,1}, \dots, J_{i,i-1}, J_{i,i+1}, \dots, J_{i,n}\} \quad (11)$$

采用集合的方式,是考虑到频点可能重合的情形。因此,干扰频点个数为

$$J_{j_1 j_2 \dots j_{n-1}} = M(J_i) \quad (12)$$

其中, M 是计算集合中的频点数量, $J_{j_1 j_2 \dots j_{n-1}}$ 是任意某一时刻受试台 i 受干扰频点的个数,公式中隐含的自变量是 $n-1$ 部干扰台的瞬时工作频点 $\{f_{j_1}, f_{j_2}, \dots, f_{j_{n-1}}\}$ 。为了得到受试台 i 受干扰频点的统计均值,需要考虑 $n-1$ 部干扰台,工作在所有 N 个频点的情形。因此,受试台 i 受干扰频点数的统计均值为

$$J = \frac{1}{N^{n-1}} \sum_{j_1=1}^N \sum_{j_2=1}^N \dots \sum_{j_{n-1}=1}^N J_{j_1 j_2 \dots j_{n-1}} \quad (13)$$

通过公式(1)~(13)可以得到任意受试台的误码率指标,需要注意的是,在实际中,必须考虑解码、解交织对误码率的改进,通过与电台的工作方式相结合^[10],才能得到实际的误码率。

4 实例分析

假设通信系统通常配置 2~4 辆车载平台,每辆车的 HF 电台为 1~3 台。一般情况下,每部电台跳频频表的频率点数 N 取值为 32、64,跳频间隔 ΔF 对应不同的 N 取值为 2~8 kHz^[14]。这里主要对共址干扰严重的情况进行分析,以配置 3 或 4 辆车为例,对车载电台配置为 $T = \{2, 2, 1\}$ 、 $T = \{2, 2, 2\}$ 、 $T = \{2, 2, 1, 3\}$ 、 $T = \{2, 2, 2, 2\}$ 几种情形进行性能评估,并给出合理的参数配置。其中 $T = \{2, 2, 1\}$ 和 $T = \{2, 2, 2\}$ 是指系统有 3 辆车,分别记为 $T-1$ 、 $T-2$ 、 $T-3$,集合中的数值为每辆车配置的 HF 电台数量,同样的, $T = \{2, 2, 1, 3\}$ 和 $T = \{2, 2, 2, 2\}$ 是指系统有 4 辆车。电台采

用 RS 编码,分组交织的工作方式对数据进行处理,车辆之间的距离矩阵(单位为 m)为

$$D_3 = \begin{bmatrix} 0 & 700 & 900 \\ 700 & 0 & 800 \\ 900 & 800 & 0 \end{bmatrix}, D_4 = \begin{bmatrix} 0 & 700 & 900 & 600 \\ 700 & 0 & 800 & 500 \\ 900 & 800 & 0 & 700 \\ 600 & 500 & 700 & 0 \end{bmatrix}$$

其中, D_3 、 D_4 分别为站点配置 3、4 辆车时,车辆两两之间的距离参数。下面分别对这 4 种系统配置下的 BER 性能进行分析,针对不同的系统配置,选择合理的 N 、 ΔF 取值范围。

首先以 $T = \{2, 2, 1\}$ 的情形为例,给出不同 N 、 ΔF 取值下的 BER,表 1 对应不同 N 、 ΔF 时解码、解交织后的 BER。按照 $T-1$ 、 $T-2$ 、 $T-3$ 的顺序给出 5 部电台的结果,其中 $T-1$ 、 $T-2$ 上有 2 部同车电台, $T-3$ 上仅有 1 部电台, 计算结果由公式 (4) 得到。

表 1 不同 N 、 ΔF 下的 BER 指标
Table 1 BER under different N , ΔF values

N	BER			
	$\Delta F = 2\text{ kHz}$	$\Delta F = 4\text{ kHz}$	$\Delta F = 6\text{ kHz}$	$\Delta F = 8\text{ kHz}$
32	0.286 7	0.055 2	8.3×10^{-3}	7.9×10^{-16}
	0.286 8	0.055 4	8.3×10^{-3}	7.9×10^{-16}
	0.286 8	0.055 6	8.3×10^{-3}	7.9×10^{-16}
	0.286 7	0.055 4	8.2×10^{-3}	7.9×10^{-16}
	0.271 4	8.3×10^{-3}	8.3×10^{-3}	0.0
64	0.151 7	6.3×10^{-6}	5.5×10^{-8}	2.0×10^{-25}
	0.151 7	6.3×10^{-6}	5.5×10^{-8}	2.0×10^{-25}
	0.151 6	6.3×10^{-6}	5.5×10^{-8}	2.0×10^{-25}
	0.151 7	6.3×10^{-6}	5.5×10^{-8}	2.0×10^{-25}
	0.124 0	5.5×10^{-8}	5.6×10^{-8}	0.0

从表 1 的 BER 可以看出, $T-1$ 和 $T-2$ 上 4 部电台的结果基本相同,这是因为这两辆车上都有 2 部 HF 电台,对这两部电台来说,都存在 1 台同车干扰和 3 台车际间干扰,而且同车干扰时的天线类型、间距等因素基本相同,因此这 4 部电台的 BER 结果基本一致。只是由于车际间干扰中距离矩阵 D 的不同,在个别频率间隔上的结果有所区别,但与同车干扰相比车际间干扰的影响较小。HF 数据 BER 容限为 1×10^{-4} ,在 $T = \{2, 2, 1\}$ 配置下系统要正常工作,当 $N = 32$ 时 ΔF 只能取 8 kHz,而 $N = 64$ 时 ΔF 可以取 4~8 kHz。

在表 1 中,由于 $T-3$ 车上只有 1 部电台,当 ΔF 取值为 2 kHz、4 kHz、8 kHz 时,它的 BER 明显小

于前面 4 部电台的结果,这是因为在这 3 个频率间隔取值上,车际间干扰的影响小于同车干扰,而在 6 kHz 取值时,车际间干扰的影响与同车干扰基本相同,这可以通过观察这两种干扰的频率覆盖范围得到。为此,依据公式(7),表 2 给出了 N 取值 32、64, ΔF 取值 2 kHz、8 kHz 时的同车、车际间干扰的频率覆盖数量,结果同样按照 $T-1$ 、 $T-2$ 、 $T-3$ 的顺序给出。

表 2 不同 N 、 ΔF 下的频率覆盖
Table 2 Frequency cover under different N , ΔF values

N	$\Delta F/\text{kHz}$	同车干扰频率覆盖数量	车际干扰频率覆盖数量	总干扰频率覆盖数量
32	2	7.50	14.23	18.35
		7.50	14.23	18.36
		7.50	14.22	18.36
		7.50	14.22	18.35
		0.00	17.37	17.37
32	8	1.97	0.00	1.97
		1.97	0.00	1.97
		1.97	0.00	1.97
		1.97	0.00	1.97
		0.00	0.00	0.00
64	2	7.75	16.00	21.81
		7.75	16.00	21.81
		7.75	16.00	21.80
		7.74	16.00	21.80
		0.00	20.37	20.37
64	8	1.99	0.00	1.99
		1.98	0.00	1.98
		1.98	0.00	1.98
		1.98	0.00	1.98
		0.00	0.00	0.00

通过表 2 可以看出,车际间干扰的频率覆盖数量大于同车干扰,但这并不代表车际间干扰影响较大。以 $N = 32$ 、 $\Delta F = 2\text{ kHz}$ 为例, $T-1$ 车上第 1 部电台的车际间干扰频率覆盖数量为 14.23,但这是 $T-2$ 车上的 2 部电台和 $T-3$ 车上的 1 部电台共同干扰的结果,平均每部电台的干扰约为 4.74 个频率点。同车干扰则来自 $T-1$ 车上的另 1 部电台,频率数量为 7.50,因此同车干扰的影响是大于车际间干扰影响的。值得注意的是,总干扰的频率覆盖数量要小于同车、车际间干扰数量之和,这是由于两种干扰的频率覆盖点存在重合,因此公式(10)采用集合的方式以消除相同频率点。

同样地,当系统配置为 $T = \{2, 2, 2\}$ 、 $T = \{2, 2, 1, 3\}$ 和 $T = \{2, 2, 2, 2\}$ 时,也可以得到不同 N 、 ΔF 取值下的 BER 和频率覆盖,这里给出不同系统配置下

可用的 N 、 ΔF 参数,见表 3。

表 3 不同系统配置下 N 、 ΔF 的取值		
Table 3 N 、 ΔF values under different configurations		
系统配置	频率点数 N	可用频率间隔 $\Delta F/\text{kHz}$
$T = \{2, 2, 2\}$	32	8
	64	5 ~ 8
$T = \{2, 2, 1, 3\}$	32	8
	64	8
$T = \{2, 2, 2, 2\}$	32	8
	64	7, 8

从表 3 可以看出,当 N 取 32 时,在 $T = \{2, 2, 2\}$ 、 $T = \{2, 2, 1, 3\}$ 、 $T = \{2, 2, 2, 2\}$ 系统配置下, ΔF 只有取 8 kHz 共址电台才能正常工作,而 N 取 64 时, $T = \{2, 2, 2\}$ 的 ΔF 可以取 5 ~ 8 kHz,即 N 的变化有效的缓解了共址干扰。当增加 2 部共址电台,使系统配置成为 $T = \{2, 2, 1, 3\}$ 或者 $T = \{2, 2, 2, 2\}$ 时, N 取 64 很难使 ΔF 的取值范围有所增加,很明显这时需要更大的跳频频率点数来缓解共址干扰,但现有电台很少超过 64 个频点,这在以后的共址设计中,必须加以考虑。

5 结束语

总之, HF 电台在车载组网环境中面临着严重的共址干扰,针对系统的级别和配置,必须依据共址误码率计算模型,选择合理的跳频点数和频率间隔,以避免共址干扰的影响,才能保障通信顺畅。此外,在现有车载电台形式下,跳频点数和频率间隔的取值受到了共址干扰的限制,这在一定程度上降低了组网电台的抗干扰能力,因此,在以后的车载电台设计中,需要通过增加隔离度,使用共址滤波器等方式,缓解共址干扰的影响,从而增强抗敌对干扰的能力。

参考文献:

[1] 周铁仿, 娄人杰. C³I 系统综合电台车 EMC 分析及模拟论证[J]. 华中科技大学学报, 2002, 30(2): 87 - 89. ZHOU Tie - fang, LOU Ren - jie. EMC analysis of integrated radio vehicle in C³I system and its simulation [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2002, 30 (2): 87 - 89. (in Chinese)

[2] Maiuzzo M, Harwood T, Duff W. Radio Frequency Distribution System(RFDS) for Cosite Electromagnetic Compatibility[C]// Proceedings of 2005 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Atlatic City, NJ:IEEE,2005:250 - 255.

[3] 赵勋旺, 张玉, 梁昌洪. 舰载多天线系统电磁兼容性分析[J]. 电波科学学报, 2008, 23(2): 252 - 256. ZHAO Xun - wang, ZHANG Yu, LIANG Chang - hong. Fast EMC analysis of multiple shipborne antennas system[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23 (2): 252 - 256. (in Chinese)

[4] Yalcin E, Girard C, Cabellic M. Modelling Interference Phenomena between Cosite Radiocommunication Equipments to Evaluate Systems Performance Degradation[C]// Proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Detroit, USA:IEEE,2008:1 - 6.

[5] 王伟勤. 跳频通信电台共址干扰及其抑制技术[J]. 电讯技术, 2011, 51(7): 178 - 182. WANG Wei - qin. Cosite Interference in Frequency Hopping Communication Radios and Suppression Techniques [J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(7): 178 - 182. (in Chinese)

[6] 袁军, 邱扬, 刘其中, 等. 基于空间映射及遗传算法的车载天线优化配置[J]. 电波科学学报, 2006, 21(1): 26 - 32. YUAN Jun, QIU Yang, LIU Qi - zhong, et al. Position optimal design of vehicular antennae via space mapping and genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(1): 26 - 32. (in Chinese)

[7] Linder S E, Stenumgaard P F. A novel method to determine the performance degradation of co - located frequency - hopping systems [C]// Proceedings of the 21st Century Military Communications Conference. Los Angeles, CA: IEEE, 2000: 19 - 23.

[8] Chan N, Peterson L. Reduction of cosite interference for digital FM frequency - hopping radios[C]// Proceedings of 1996 Military Communications Conference. McLean, VA: IEEE, 1996: 1036 - 1040.

[9] 田锦, 谢拥军, 邱扬, 等. 共址跳频系统组网优化[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(3): 354 - 358. TIAN Jin, XIE Yong - jun, QIU Yang, et al. Optimization of Network Design for Co - Site Frequency - Hopping System [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(3): 354 - 358. (in Chinese)

[10] 赵波, 全厚德, 崔佩璋. 车载无线电台同址干扰测试与分析[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(8): 1868 - 1871. ZHAO Bo, QUAN Hou - de, CUI Pei - zhang. Testing and Analysis of Co - site Interference on Vehicular Radios [J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19(8): 1868 - 1871. (in Chinese)

[11] Zhao Bo, Quan Houde, Zhao Huiqiang. The Influence of Adjacent Channel Interference on FM Communication System[C]// Proceedings of 2009 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Nanjing:

- IEEE, 2009: 1 – 4.
- [12] 赵波, 全厚德, 赵汇强. 无线电通信中的同址干扰问题研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(11): 4242 – 4244.
ZHAO Bo, QUAN Hou – de, ZHAO Hui – qiang. Research on co – site interference problem of radio communication [J]. Application Research of Computers, 2010, 27(11): 4242 – 4244. (in Chinese)
- [13] 赵波, 全厚德, 崔佩璋. 无线电同址干扰定量分析方法研究[J]. 电波科学学报, 2011, 26(5): 837 – 843.
ZHAO Bo, QUAN Hou – de, CUI Pei – zhang. Quantitative analysis on radio co – site interference [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(5): 837 – 843. (in Chinese)
- [14] 姚富强. 通信抗干扰工程与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 240 – 242.
YAO Fu – qiang. Engineering and practice of communication anti – interference [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 240 – 242. (in Chinese)

作者简介:

全厚德(1963—), 男, 辽宁大连人, 2008 年获博士学位, 现为教授, 主要研究方向为情报指挥系统、通信设备性能测试;
QUAN Hou-de was born in Dalian, Liaoning Province, in

1963. He received the Ph.D. degree in 2008. He is now a professor. His research concerns intelligence command system and the performance test of communication device.

Email: zhaoanli2005@sohu.com

赵 波(1982—), 男, 河北石家庄人, 2011 年获博士学位, 主要研究方向为跳频电台通信性能测试;

ZHAO Bo was born in Shijiazhuang, Hebei Province, in 1982. He received the Ph.D. degree in 2011. His research concerns the communication performance test of FH radio.

Email: majinmiao01@163.com

尹中秋(1981—), 男, 河北石家庄人, 2007 年获硕士学位, 现为工程师, 主要研究方向为通信与信息系统;

YIN Zhong-qiu was born in Shijiazhuang, Hebei Province, in 1981. He received the M.S. degree in 2007. He is now an engineer. His research direction is communication and information system.

Email: gaotian09@163.com

何 丰(1983—), 男, 河北石家庄人, 助理工程师, 主要研究方向为通信设备性能测试。

HE Feng was born in Shijiazhuang, Hebei Province, in 1983. He is now an assistant engineer. His research concerns the performance test of communication device.

Email: hefeng@126.com