

跳频处理增益有关概念分析与修正

姚富强

(南京电讯技术研究所,江苏南京 210007)

摘 要: 本文对跳频处理增益原始定义和算法中存在的有关问题进行了分析和修正,扩大了适用范围,澄清了一些概念,有利于技术指标的界定和设备的检验.在此基础上,进一步讨论了跳频处理增益与系统抗干扰能力的关系,并提出了常规跳频抗阻塞干扰门限的概念.

关键词: 跳频; 扩展频谱; 通信抗干扰

中图分类号: TN914.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 07-0966-04

Analysis and Modification for Some Concepts of Frequency Hopping Processing Gain

YAO Fu-qiang

(Nanjing Telecommunication Institute, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract: This paper analyses and modifies some problems in original definition and algorithm of Frequency Hopping Processing Gain, and some concepts are clarified. It is favourable to expanding the applicable field, defining the technical indexes and checking the designed equipments. Based on which, the relationship between Frequency Hopping Processing Gain and the anti-jamming ability of the system is further discussed. And a concept of the threshold for anti-obstruct-jamming in common frequency hopping system is put forward yet.

Key words: frequency hopping; spread spectrum; anti-jamming communication

1 引言

跳频处理增益看起来是一个简单的概念,从一般意义上讲,它表明了跳频通信抗阻塞干扰的能力,也表明了干扰方要阻塞干扰跳频通信所付出的代价.前人和已有著作对跳频处理增益进行了有条件 and 简洁的阐述^[1],其基本概念在人们的思想中已根深蒂固.但是,随着技术的迅速发展和通信抗干扰技术研究的逐步深入,在实际工作中遇到了一些问题,已有教材和有关著作^[1,2]中也没有交代清楚,给技术指标界定和设备检验带来了不便,甚至争论不休.主要有:已有跳频处理增益定义和算法的适用范围有限或有模糊之处,因而在涉及到跳频处理增益不同的前提条件时,人们对跳频处理增益的计算感到很茫然;另外,跳频处理增益对抗干扰能力到底起什么作用,跳频处理增益能否唯一地表征系统的抗干扰能力等等.本文试图对一些概念进行澄清、完善和统一,以给工程实践带来方便和增强可操作性.实际上,这些问题既涉及到理论问题,又涉及到工程问题.只有结合实际需要,从理论和概念上加以探讨和解决,才能更好地指导科研实践.

2 跳频处理增益的已有定义和算法

在跳频通信过程中,某一时刻只出现一个瞬时频谱,该瞬

时频谱即为原始信息经跳帧处理和中频调制后的频谱,其带宽稍大于原信息速率在定频通信时的带宽,并且该瞬时频谱的射频是跳变的.跳频处理增益计算的依据是扩展频谱处理增益 G_p 的定义式^[1]:

$$G_p = W/R, \text{ 或 } G_p = 10\log_{10}(W/R) \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

式中 W 为扩展频谱后的信号总带宽; R 为原信号带宽.在跳频通信中, W 为跳频扩谱覆盖的总带宽, R 为跳频瞬时带宽.



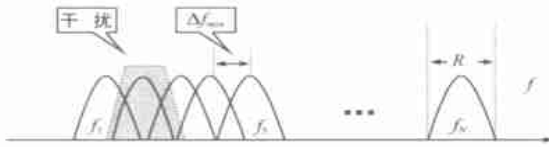
图1 $f_{\min} > R$, 相邻瞬时频谱不交叠

文献[1]指出在频域上两两相邻的跳频瞬时频谱不交叠(即:跳频最小频率间隔 f_{\min} 大于跳频瞬时带宽 R , 如图1所示)或两两相邻瞬时频谱零点相接(即:跳频最小频率间隔 f_{\min} 等于跳频瞬时带宽 R , 如图2所示)的前提条件下,跳频处理增益 G_{fp} 等于全部可用频率数 N

$$G_{fp} = W/R = N, \quad f_{\min} > R, \quad f_{\min} = R \quad (2)$$

式中: W 和 R 的意义同上.也可取分贝表示:

$$G_{fp} = 10\log_{10} N \quad (\text{dB}), \quad f_{\min} > R, \quad f_{\min} = R \quad (3)$$

图 2 $f_{\min} = R$, 相邻瞬时频谱零点相接图 3 $f_{\min} < R$, 相邻瞬时频谱交叠

3 跳频处理增益已有定义和算法中存在的问题

式(1)作为扩展频谱处理增益的原始定义及其理论基础是完全正确的,至今没有疑义。但式(2)、(3)跳频处理增益定义的适用范围不够全面,并且还存在着不够准确或有疑义之处。主要有:式(2)和(3)在 $f_{\min} > R$ 和 $f_{\min} = R$ 两种条件下得出了相同的结论,尽管可用频率数的概念没有错误,但不便于实际操作,例如在实际频率数相同时,两种情况下的跳频带宽显然是不一样的;实际中还存在 $f_{\min} < R$ 的情况,此时如何计算其跳频处理增益?式(2)和式(3)没有给出。在实际频率数相同的前提下,又如何度量和比较 $f_{\min} > R$ 、 $f_{\min} = R$ 和 $f_{\min} < R$ 三种情况的系统抗阻塞干扰能力?在实际设备中,可用频率数 N 不一定等于实际频率数 N_a ,这是由于:

$$N = W/R \quad (4)$$

$$N_a = W/f_{\min} \quad (5)$$

而多数情况下 $f_{\min} > R$,只有在 $f_{\min} = R$ 时,才有 $N = N_a$ 。

从理论上讲,可用频率数表明了系统潜在的抗阻塞干扰能力,而在科研实践中,人们所提的频率数往往是指实际频率数,并且可用频率数在实际设备中往往仅是一个理论值(禁用频率问题除外),因而出现了概念上的模糊和争议。

可见,有必要将跳频处理增益计算时涉及到的 $f_{\min} = R$ 、 $f_{\min} > R$ 和 $f_{\min} < R$ 三种情况作为前提,对跳频处理增益的定义和算法进行修正,以求得到一种能适用这三种情况的统一的定义和算法。

4 跳频处理增益算法的修正

$f_{\min} = R$ 、 $f_{\min} > R$ 和 $f_{\min} < R$ 三种情况的跳频处理增益 G_{tp} 的计算既有区别又有联系。

4.1 $f_{\min} = R$ 时跳频处理增益

在 $f_{\min} = R$ 前提下, $N = N_a$,从实际设备中可以直接得到,由图 2 可得到严格的数学关系:

$$W = N \cdot f_{\min} = N \cdot R = N_a \cdot R \quad (6)$$

由此可得:

$$G_{\text{tp}} = W/R = N = N_a, \quad f_{\min} = R \quad (7)$$

$$\text{或: } G_{\text{tp}} = 10\log_{10} N = 10\log_{10} N_a \quad (\text{dB}), \quad f_{\min} = R \quad (8)$$

可见,式(7)、(8)是式(2)、(3)的一部分,或者说式(2)、(3)仅在 $f_{\min} = R$ 条件下成立。式(7)、(8)是跳频处理增益计算的一个最基本公式,但它不具有广泛性,是以 $f_{\min} = R$ 为条件的,可以将其作为其它两种情况的比较标准,而以前人们常常将跳频处理增益等于跳频频率数的结论不加条件地套用到其它场合。

4.2 $f_{\min} > R$ 时跳频处理增益

在式(2)、(3)中, $f_{\min} > R$ 与 $f_{\min} = R$ 两种情况跳频处理增益的定义和算法是一样的,很容易理解,在实际跳频频率数 N_a 相等的条件下,这两种情况的抗阻塞干扰的能力是不一样的,应是前者大于后者。因为,尽管实际跳频频率数相等,但 $f_{\min} > R$ 时的最小跳频间隔是 f_{\min} ,没有将可用频率数 W/R 作为实际频率数,而将 W/f_{\min} 作为实际频率数; $f_{\min} = R$ 时的最小跳频间隔是 R ;这两种情况下的跳频总带宽:

$$N_a \cdot f_{\min} > N_a \cdot R \quad (9)$$

敌方付出的代价是前者大于后者。

在 $f_{\min} > R$ 的情况下有:

$$N > N_a \quad (10)$$

此时系统中的 N 是一个理论值,而 N_a 又不足以表示跳频处理增益,需要在式(2)、(3)的基础上进行修正:

$$G_{\text{tp}} = W/R = N = N_a \cdot k, \quad f_{\min} > R \quad (11)$$

$$G_{\text{tp}} = 10\log_{10} N_a + 10\log_{10} k \quad (\text{dB}), \quad f_{\min} > R \quad (12)$$

式中: N 为可用频率数; N_a 为实际频率数; k 为修正因子, $k = N/N_a = f_{\min}/R$, $k > 1$, $k \neq 0$, k 的物理意义表示了 N_a 相同条件下, $f_{\min} > R$ 时的跳频带宽大于 $f_{\min} = R$ 时的跳频带宽的倍数,也是 $f_{\min} > R$ 时实际频率数比可用频率数减少的倍数。

4.3 $f_{\min} < R$ 时跳频处理增益

在式(2)、(3)中也没有对 $f_{\min} < R$ 情况下的跳频处理增益计算进行描述,而这种情况在实际中又经常遇到。此时,可用频率数小于实际频率数,即: $N < N_a$, 两两相邻的跳频瞬时频谱出现交叠,系统可用频率数也是一个理论值。 $f_{\min} < R$ 与 $f_{\min} = R$ 相比较,如果这两种情况的实际跳频频率数相等,但其抗阻塞干扰的能力也是不一样的,应是前者小于后者。很容易理解,尽管实际跳频频率数相等,但这两种情况下的跳频总带宽也是不一样的,即:

$$N_a \cdot f_{\min} < N_a \cdot R \quad (13)$$

频谱出现交叠的部分对跳频处理增益没有贡献,敌方对 $f_{\min} < R$ 付出的代价要小于 $f_{\min} = R$ 的情况,并且一个干扰频率可以干扰多个相邻的跳频频率,如图 3 所示。另一方面,在使用全向天线和相同频率表(或频率表的部分频率相同)进行跳频组网时, $f_{\min} < R$ 还会出现己方网系间的相互干扰。因此,在这种情况下,实际跳频频率数也不足以表示跳频处理增益,同样需要在式(2)、(3)的基础上进行扩展:

$$G_{\text{tp}} = W/R = N = N_a \cdot k, \quad f_{\min} < R \quad (14)$$

$$G_{\text{tp}} = 10\log_{10} N_a + 10\log_{10} k \quad (\text{dB}), \quad f_{\min} < R \quad (15)$$

式中: N 为可用频率数; N_a 为实际频率数; k 为修正因子, $k = N/N_a = f_{\min}/R$, $k < 1$, $k \neq 0$, k 的物理意义表示了 N_a 相同

条件下, $f_{\min} < R$ 跳频带宽小于 $f_{\min} = R$ 跳频带宽的倍数,也是 $f_{\min} < R$ 实际频率数大于可用频率数的倍数。

4.4 修正后的统一表达式及其实用性

根据以上分析结果及其适用条件,可以得出三点结论:

结论 1 式(2)、(3)和式(7)、(8)是式(11)、(12)和式(14)、(15)的特殊情况,而式(11)、(12)和式(14)、(15)是式(2)、(3)和式(7)、(8)的推广。

结论 2 若在式(11)、(12)和式(14)、(15)的条件中增加 $f_{\min} = R$, 则式(11)、(12)和式(14)、(15)包含了式(7)、(8),并且在 $f_{\min} = R$ 的条件下,式(11)、(12)和式(14)、(15)均变为式(7)、(8),此时修正因子 $k = f_{\min}/R = 1$ 。

结论 3 由于式(11)、(12)和式(14)、(15)及其修正因子的数学表达形式一致,且在 $f_{\min} = R$ 的条件下,又包含了式(7)、(8),所以 $f_{\min} = R$ 、 $f_{\min} > R$ 和 $f_{\min} < R$ 三种情况的跳频处理增益可以合并成同一个表达式,即修正后的跳频处理增益的统一定义和算法为:

$$G_{\text{TP}} = W/R = N_a \cdot k \quad (16)$$

$$G_{\text{TP}} = 10\log_{10} N_a + 10\log_{10} k \quad (\text{dB}) \quad (17)$$

式中: N_a 为实际频率数, k 为修正因子, $k = f_{\min}/R$, $k > 0$ 。

式(16)、(17)在扩谱理论上,以相同的标准,客观地反映了跳频相邻频谱不交叠、交叠和两两零点相接对跳频处理增益的影响,涉及到的三个参数 N_a 、 f_{\min} 和 R 在跳频相邻频谱三种关系对应的系统中都是实际的参数,可经系统设计和测量直接得到,具有很强的实用性和可操作性。在计算时要注意前提条件,不能简单地将系统实际频率数作为跳频处理增益。

值得指出的是:在一次跳频通信中全体跳频频率点的集合称为跳频频率表。一般说来,式(16)、(17)中的实际频率数即为一张频率表中频率的个数,而不是指工作频段中的频率数。一种跳频通信设备一般有多张跳频频率表,每张频率表中的频率个数相等,有时为了节省频率资源,允许不同的频率表有部分频率相同。在频率资源有限的情况下,有时只有一张频率表,此时频率表中的频率个数即为工作频段中的实际频率数。

5 跳频处理增益与抗干扰能力的关系

不可否认,跳频处理增益与系统的抗干扰能力有密切的联系,但是人们的看法还存在一些分歧,甚至误区,有些概念需要讨论和更新。

5.1 跳频处理增益是针对抗阻塞干扰而言的,而抗阻塞干扰能力又是针对定频通信而言的

跳频通信的干扰威胁主要有阻塞干扰和跟踪干扰(含转发式干扰)两大类,系统的抗阻塞干扰能力主要表现在跳频处理增益和功率两个方面。当然,如果系统组网后具有迂回通信能力,也有利于抗阻塞干扰。在系统的功率和组网能力一定的条件下,系统的抗阻塞干扰能力主要依赖于跳频处理增益。如图1、图2和图3所示,但这三种情况在同样跳频频率数和同样带宽的阻塞干扰时,可通频率数是不相同的:当 $f_{\min} = R$ 时,若 N_j 个频率被干扰,则可通频率数为 $N - N_j$ 个;但 f_{\min}

$> R$ 的被干扰频率数要小于 N_j 个,则可通频率数大于 $N - N_j$ 个;当 $f_{\min} < R$ 时,相邻频谱产生交叠,此时一个干扰频率可以干扰多个相邻的跳频频率,可通频率数小于 $N - N_j$ 个。相比之下,定频通信只有一个射频相对固定的频谱,如果此时受到干扰,且干扰功率足够,则通信中断。因此,从理论上讲,必须有效阻塞干扰 N 个频率才能达到与干扰定频同样的效果,但从实际效果和相对关系来讲, $f_{\min} = R$ 和 $f_{\min} > R$ 时的抗阻塞干扰能力一般为小于各自跳频总带宽或频率数的三分之一, $f_{\min} < R$ 的实际抗阻塞干扰能力还要低于此值,可以将三分之一跳频带宽/频率数称为常规跳频实际抗阻塞干扰能力的相对门限,而将实际能抵抗的干扰带宽称为抗阻塞干扰能力的绝对门限。如果干扰带宽超过该门限值,系统的通信效果将严重恶化甚至通信中断,此时系统实际上得不到跳频处理增益,常规跳频实际抗阻塞干扰的绝对门限值要低于理论上的跳频干扰容限。当然,跳频处理增益越大,则绝对门限值相应提高,但相对门限值仍然不变。这就是干扰方阻塞干扰跳频通信时常采用部分频带干扰,而不采用全频段干扰的原因。

5.2 跳频处理增益不能完全描述系统的抗阻塞干扰能力

以上对跳频处理增益与系统抗阻塞干扰能力关系的分析是从常规意义上讲的,即:跳频处理增益越大,系统的抗阻塞干扰能力越强。但由于其抗阻塞干扰的相对门限和跳频频率集固定不变,在受到点频和部分频带阻塞干扰(包括民用干扰)情况下,系统仍盲目地往受干扰频点上跳,出现了“频率盲区”,使得系统平均误码率 $0.5 \times N_j/N$ 随着受干扰频率数 N_j 的增加而线性增加,形成了所谓的“盲跳频”现象,如图4所示。

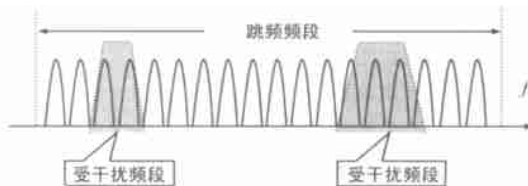


图4 “盲跳频”的形成

示,这是常规跳频体制的最大弱点,因而也将常规跳频称为“盲跳频”。针对“盲跳频”及其三分之一频段干扰门限效应机理,干扰方普遍采用了“三分之一频点/段干扰策略”^[3],在这种情况下,仅靠提高跳频处理增益不能从根本上解决抗阻塞干扰问题。为此,实时频率自适应跳频体制应用而生,它可以在跳频通信过程中实时地检测和删除受干扰频率,使系统在无干扰或干扰较弱的频率上跳频,不刻意追求跳频处理增益(即:跳频频率数的多少),而追求频率自适应处理的系统增益,只要能保证通信即达到目的。频率自适应处理系统增益 G_a 定义为:在同样阻塞干扰条件下,常规跳频的系统平均误码率 P_e 与频率自适应跳频在自适应收敛以后的系统稳态误码率 P_{ea} 之比,即误码率降低的倍数:

$$G_a = \frac{P_e}{P_{ea}} = \frac{0.5 \times N_j/N}{0.5 \times (N_j - J)/N} = \frac{N_j}{N_j - J} \quad (18)$$

式中: N_j 为受干扰频率数; J 为被自适应处理或被删除的受干扰频率数,且 $J < N_j$ 。当 $J = N_j$ 时, G_a 无穷大,此时频率自适应跳频系统的稳态误码率为0,也就是说,只要有一个频率未被

干扰,系统就能正常工作,因而从理论上突破了“三分之一频点/段干扰”策略的限制。此时,跳频处理增益已不能完全描述系统的抗阻塞干扰能力了。这就推出了一个新的也是很实际的理念,即:跳频是手段,不是目的,而保证通信才是最终目的。当然,从工程上讲,实现实时频率自适应跳频也是有限度和有条件的。

5.3 提高跳频处理增益有利于提高系统抗跟踪干扰能力

从理论上讲,系统的抗跟踪干扰能力与跳频处理增益没有直接的关系,而与跳频速率、组网能力、跳频图案和跳频密钥等因素有直接关系,但在使用中与跳频处理增益有间接的关系。一方面,跳频频率数越多,干扰方对跳频信号的侦察分选就越困难,难以确定干扰目标和干扰频率集;另一方面,跳频频率数越多,迫使跟踪干扰发射机需要有更大的带宽和更大的频率集,如果跳频频率数和跳频带宽超过了跟踪干扰发射机的频率范围,即使其跟踪速度足够快,也实现不了有效的跟踪干扰。

5.4 跳频处理增益的增加受到多种因素的限制

由于增大跳频处理增益,有利于提高系统的抗干扰能力特别是抗阻塞干扰能力,所以增大跳频处理增益是提高抗干扰能力的一种有效途径。但在实际中,增大跳频处理增益往往受到很多限制,比如过多的频率需要占用很宽的频带资源;在给定跳频带宽的条件下,如果需要提高信息传输速率即通信容量,跳频瞬时带宽随之增加,造成有效频率数减少;即使有充足的频带资源可以利用,往往信道机和天线的覆盖范围也难以做到等等。所以,在给定频率资源和信息速率的前提下,跳频通信还需要采取其它增效措施,比如采用高效调制技术,尽可能压缩瞬时带宽,以提高跳频处理增益;采用频率自适应跳频技术,以提高抗阻塞干扰能力;采用功率自适应跳频技术,以提高网间电磁兼容性和硬抗能力;采用交织和纠错编码技术,以提高误码性能等等。还可以从使用上增强抗干扰效果,比如采用正确组网和频谱管理等措施,以提高频谱利用率等等。

6 结束语

本文讨论的内容来源于实际,是通信学术界目前关心的

问题之一。文中对有关概念进行了梳理和修正,得出了一些明确的结论,希望能对通信抗干扰学术研究和科研实践有所裨益。需要总结的几点是:

(1) $f_{\min} = R$ 、 $f_{\min} > R$ 和 $f_{\min} < R$ 三种情况下的跳频处理增益及其计算是有区别的,式(16)、(17)给出了相同标准的统一表达式,反映了系统实际的跳频处理增益,但都应该等于可用频率数,不能简单地采用实际频率数计算跳频处理增益。

(2) 任何一种抗干扰体制都不是完美的,也不是万能的,是有条件的,不能指望某一种抗干扰体制什么干扰都可以抵抗,也不能以个别性的前提得出普遍性的结论。

(3) 常规跳频的抗阻塞干扰能力存在相对门限和绝对门限,阻塞干扰超过跳频系统相对门限时,系统将不能正常工作,此时实际上得不到跳频处理增益,增加跳频带宽或频率数虽然可以提高绝对门限,但相对门限不变。

(4) 跳频处理增益是衡量系统抗阻塞干扰能力的重要指标,但不是唯一指标。除了技术上有多种组合、多种增效措施以及其它指标以外,还有使用问题。

参考文献:

- [1] R C 狄克逊. 扩展频谱系统 [M]. 北京:国防工业出版社,1982. 1 - 29.
- [2] Donj Torrieri. Principles of Military Communication Systems [M]. USA:Artech House, Inc. 1981.
- [3] 姚富强. 通信电子战策略研究 [J]. 现代军事通信,1996,13(3): 20 - 27.

作者简介:



姚富强 男,1957年出生于安徽省安庆市,博士,南京电讯技术研究所研究员、博士生导师、中国电子学会会士;主要研究领域:通信抗干扰体制与技术、无线通信;已发表学术论文100多篇,获国家及省部级科技进步奖以及国家专利多项。