

变换域重叠隐蔽通信系统的隐蔽性度量方法^①谢铁城^{②*} 达新宇^{③*} 褚振勇* 张衡阳* 王 舒*

(* 空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

(** 中国人民解放军 94900 部队 漳州 363000)

摘 要 提出了一种基于频域加权的均方误差(MSE)感知失真度量方法以评价变换域重叠隐蔽通信系统的隐蔽性能。该方法针对 Q 因子度量方法应用于变换域重叠隐蔽通信的局限,根据变换域通信系统的基本原理,将信号的感知失真从时域转到频域进行度量,根据不同宿主信号频谱幅值对于叠加的隐蔽信号的感知失真程度不同,以宿主信号频谱幅值的倒数为加权因子,分别对宿主信号各频点的感知失真做加权求和,从而得到系统的感知失真度量结果。仿真结果表明,该方法不仅可以提高系统感知失真能力,与重叠隐蔽通信的基本机理保持一致,符合实际感知效果,而且还统一了系统感知能力与抗干扰能力,可以为隐蔽系统的设计提供有效参考。

关键词 变换域通信系统(TDCS),重叠隐蔽通信,隐蔽性度量,感知失真度量,频域加权,均方误差(MSE)

0 引 言

变换域重叠隐蔽通信是一种特殊的信息隐蔽传递方法,它以已存在的第三方通信信号为掩护,通过在时频域以信号重叠的方式将隐蔽信号叠加于背景信号之中,同时结合变换域通信系统(transform domain communication system, TDCS)的抗干扰和抗截获特性^[1],通过 TDCS 完成隐蔽信息的收发,当隐蔽信号功率低到不对第三方通信造成影响时便可实现信息的隐蔽传递。这种重叠的隐蔽通信是一种抗截获能力强、保密性好、顽存性强的特殊通信方式,可以作为战时一种重要的最低限度通信手段。与其他信息隐藏系统和方法一样,这种重叠的隐蔽通信方式也需要进行合理性评估,如何对其隐蔽性能进行评估是该系统的重要研究内容。通过对隐蔽性能的分析与测试,可以发现隐蔽系统的局限性并有针对性地对其进行改进,使隐蔽系统的可行性与安全性进一步得到保障,以便得到更好的实际应用。制定合理的隐蔽性能评价标准和基准测试,对重叠隐

蔽通信系统的隐蔽通信性能的提高和完善起着全面的保障作用^[2]。本研究基于这种考虑开展了工作,提出了一种基于频域加权的均方误差感知失真度量方法用于评价变换域重叠隐蔽通信系统的隐蔽性能,并通过实验验证了该方法的有效性。

1 相关研究

目前,信息隐藏的隐蔽性能评价研究主要以数字水印为研究对象,研究内容也集中于水印嵌入过程中引起的感知失真,其感知测度的研究方法也主要是借鉴了图像处理与压缩中的失真衡量方法,如差分质量评价方法^[3-5]等,其中以均方误差(mean squared error, MSE)度量方法和峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)度量方法的应用研究最为广泛。这些方法具有较明确的物理意义,但在数字水印隐蔽性能评价上却不能很好符合人类的实际感知情况。为了解决这个问题,有人提出了基于人类视觉系统(human visual system, HVS)模型,并针对某个具体水印嵌入算法对均方误差方法进行了各

① 国家自然科学基金(60972042, 61271250, 61202490)和空军工程大学信息与导航学院研究生论文创新基金(2011004)资助项目。

② 男,1983 年生,博士生;研究方向:变换域卫星隐蔽通信;E-mail: tie008@qq.com。

③ 通讯作者,E-mail: daxinyu@vip.sina.com

(收稿日期:2013-08-07)

种改进^[6-10],取得了与人类视觉感知较为一致的结果。然而,针对这种重叠的隐蔽通信系统的隐蔽性能评价却鲜见研究报道。由于重叠的隐蔽通信与以数字水印为代表的信息隐藏在隐藏的目的、对象及方法等都有明显的区别,如数字水印中的隐藏信息主要表示为被嵌入载体的基本属性,信息隐藏的作用为保护这些基本属性的不被识别与破坏,而重叠的隐蔽通信主要是为了传递隐蔽的信息本身,因此,在性能评价上的侧重点必然有所不同。并且数字水印中主要以图像为嵌入载体,而重叠的隐蔽通信则以第三方通信信号为掩护载体,显然,基于人类视觉系统模型的感知方法并不适合于重叠的隐蔽通信。

针对这种现状,本文在研究交换域通信系统(TDCS)重叠隐蔽通信基本原理与已有信息隐藏感知度量方法的基础上,分析了通用的感知性能评价与信号重叠隐蔽通信的隐蔽特性要求之间的异同之处,在满足信号重叠隐蔽通信隐蔽性要求的基础上,将Q因子度量应用于重叠隐蔽通信的隐蔽性度量并给出实验结果。随后根据Q因子度量的不足之处,在研究TDCS重叠隐蔽通信本质特性的基础上,对均方误差方法进行改进,提出了基于频域加权的均方误差度量方法。这种方法可以反映隐蔽信号重叠前后频域数据的变化,与TDCS重叠隐蔽通信基本原理一致,避免了传统均方误差无法充分表征重叠隐蔽通信隐蔽性能的问题。这种隐蔽性度量方法在衡量系统的感知性能的同时,还能与系统的抗干扰性进行统一。

2 TDCS 重叠隐蔽通信及已有的感知度量方法

2.1 TDCS 重叠隐蔽通信基本原理

所谓的重叠隐蔽通信是指隐蔽通信信号以“寄生”的方式叠加在宿主信号中,在不影响宿主通信效果的基础上完成信息的隐蔽传递。由于隐蔽信号是重叠于宿主信号之上,而宿主信号可能由不同用户且不同形式的信号组成,因此,隐蔽信号需要对宿主信号实时感知并设计发射信号,才能在不影响宿主通信的条件下进行隐蔽通信。

根据TDCS的基本原理,隐蔽系统发送端由采样器在目标信号频带宽度内进行频谱采样,得到宿主信号等效的基带频谱幅值。然后与一个选定的门限值比较并标记空闲频谱,如果背景信号频谱幅值大于门限值则置0表示频谱占用,反之置1表示频

谱空闲,从而得到TDCS基函数幅度谱矢量。基函数幅度谱矢量与等长度的复随机矢量对应元素相乘得到新的信号矢量,即频域基函数,接着经过幅度调整确保足够的信号发射功率,并作离散傅立叶反变换(inverse discrete Fourier transform, IDFT)得到基函数的时域形式。由于频域基函数向量由复随机矢量组成,因此,经过IDFT之后的时域基函数波形具有类噪声的特性,并且其频谱与背景信号正交,从而具有良好的抗截获与抗干扰能力。假定在一定的时间内背景电磁环境恒定不变,则将基函数进行存储,并与要发送的数据进行调制,最后经数模转换、射频功率放大器,最后由天线发射,从而完成与宿主信号叠加,其中调制方式可以有循环码移键控(cyclic code shift keying, CCSK)调制、多进制相移键控(m-ary phase shift keying, MPSK)调制等。

接收端也在相同带宽内先通过采样和随机相位生成得到本地的基函数参考波形,当收发双方处于相同的电磁环境下,并且随机相位生成规则相同,这样收发双方的基函数是一样的。接收端对接收信号进行下变频并采样得到采样信号,然后与本地捕获的基函数参考波形进行相关检测从而确定同步时间,并完成信号解调。由基函数的产生过程可知,外界电磁环境的变化将会生成新的基函数,这种动态的处理保证了隐蔽系统的实时跟踪能力,确保了隐蔽信号的隐蔽性能和抗干扰效果。对于宿主信号来说,叠加的隐蔽信号可以认为是与信道噪声相独立的高斯白噪声,因此只要控制隐蔽信号的功率谱可以不对原业务造成影响。至此完成一个完整的基于TDCS的隐蔽通信过程。

2.2 已有的信息隐藏感知度量方法

从已公开的研究文献来看,在以数字水印为代表的信息隐藏研究领域,关于感知失真度量的方法有依靠人观察感觉的主观测试方法和从数学角度上分析的客观质量评价方法。

主观测试方法受测试人员的背景知识、测试环境等因素影响与限制,不同人员测试结果不尽相同,一致性较差并且主要针对图像的视觉感知效果,因此,并不适用于重叠的隐蔽通信。

客观质量评价方法主要包括基于像素距离测度的度量方法和基于信号统计相关的度量方法,其中基于信号统计相关的度量是作为像素距离测度度量方法的一种补充,在一定条件下这两种度量方法是等价的。如果将这两种方法应用于重叠隐蔽通信,度量的是隐蔽信号重叠前后的距离测度和重叠信号

与宿主信号的相关性。这时是以时域采样数据为样本数据进行计算。而根据 TDCS 解调原理,频域基函数向量由复随机矢量,经过 IDFT 之后信号时域波形具有类噪声的特性,同一位置不同时刻信号的采样幅度不一定相同。因此,即使相同基函数生成方式,相同的信号重叠强度,不同时刻的采样幅值序列也不相同,对于隐蔽信号重叠前后每次测量的信号距离测度也不相同,因此,这些基于像素距离测度与相关性的度量算法并不能直接应用于重叠隐蔽信号度量。

在信息隐藏领域的其他度量算法中 Q 因子度量是基于统计数据如像素均值、均方差等来度量图像之间的相关程度来计算的,不需要单独测量每个位置的像素值,因此可以适用于重叠的隐蔽通信系统。下面对其应用做仿真分析。

3 Q 因子度量及其在重叠隐蔽通信中的应用

3.1 Q 因子度量方法

设 $X = \{x_i | i = 1, 2, \dots, N\}$, $Y = \{y_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 分别表示信息隐藏前后的图像信号, Q 因子的定义为

$$Q = \frac{4\delta_{xy}\bar{x}\bar{y}}{(\delta_x^2 + \delta_y^2)(\bar{x}^2 + \bar{y}^2)} \quad (1)$$

其中 $\bar{x}$ 与 $\bar{y}$ 为图像像素均值, δ_x^2 与 δ_y^2 为像素方差, δ_{xy} 为信息隐藏前后图像的协方差,表达式分别为

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \delta_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2,$$

$$\delta_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2, \delta_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}).$$

可以看出, Q 因子度量方法是以图像的数字特征如均值、方差、协方差来描述图像之间的相关程度,这种方法需要的仅是整个图像的统计量,而对于 TDCS 重叠隐蔽通信来说,尽管同一位置各个时刻的采样值不相同,但隐蔽时域信号具有类噪声的效果,当隐蔽信号功率确定之后其时域的统计量是不变的,因此这种方法可以应用于重叠的隐蔽通信。Q 因子的变化范围为 $[-1, 1]$, 当 $y_i = x_i, i = 1, 2, \dots, N$ 时 $Q = 1$, 表示为图像的变化为零即图像没有失真; 当 $y_i = 2\bar{x} - x_i, i = 1, 2, \dots, N$ 时 $Q = -1$, 表示此时图像的失真最严重。

3.2 Q 因子度量在重叠隐蔽通信的应用

显然, Q 因子度量方法是适用于 TDCS 重叠隐蔽通信的。当应用于 TDCS 重叠隐蔽通信时, 同样地, 式(1)中的 $X = \{x_i | i = 1, 2, \dots, N\}$, $Y = \{y_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 则表示为隐蔽信号重叠前后的采样信号幅值。与此相对应, TDCS 重叠隐蔽通信的 Q 因子度量方法描述的失真因素分别为相关性失真、平均功率失真和对比度失真。

下面对 TDCS 重叠隐蔽通信的 Q 因子度量方法做仿真测试。TDCS 隐蔽信号是根据宿主信号的频谱设计 TDCS 基函数幅度谱并与复伪随机相位做数量积, 从而得到已调隐蔽信号的等效基带频谱分布。这里假设宿主信号等效基带频谱采样周期为 64, 并采用共轭对称频谱, 即频谱幅值成偶对称, 相位成奇对称。与幅度谱同长度的复伪随机相位序列按 $[0, 2\pi]$ 均匀分布随机产生。为了不失一般性, 假设系统信道为高斯白噪声信道。

根据式(1), 在不同干信比和信噪比条件下对 TDCS 重叠隐蔽系统的 Q 因子逐一做了计算, 结果如图 1 所示。图 1 仿真条件是: TDCS 隐蔽通信系统标记宿主信号空闲频谱时用的门限设置为宿主信号频谱幅值最大值的 0.2 倍, 即当宿主信号幅度谱值高于该门限时, 该位置的 TDCS 基函数幅度谱设置为 0, 反之设置为 1。隐蔽信号信噪比即隐蔽信号与信道噪声功率比取为 $-8\text{dB} \sim -18\text{dB}$, 干信比即宿主信号与隐蔽信号功率比取为 $0 \sim 15\text{dB}$ 。从图中可以看出, 当信噪比确定时, Q 因子的大小与系统的干信比成正比, 而当干信比确定时, Q 因子的大小与信噪比成反比。也就是说干信比越大、信噪比越小, 重叠之后引起宿主信号的失真度越小。从功率感知角度上讲, Q 因子计算与实际感知也是相符的, 隐蔽信号功率越低, 叠加之后对宿主信号的影响也就越小。

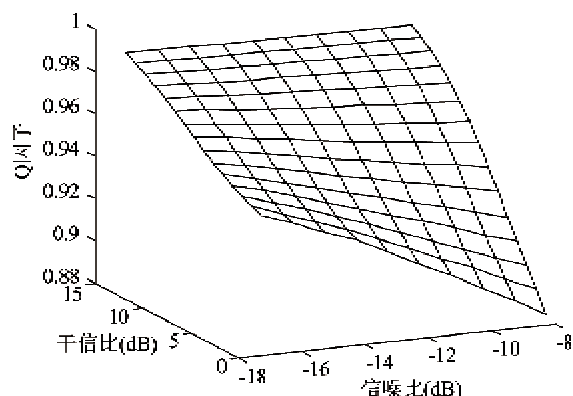


图 1 固定门限条件下的隐蔽通信系统 Q 因子

考虑到 TDCS 隐蔽信号频谱是在对宿主信号频谱做空闲频谱标记之后得到,不同门限标记后得到的隐蔽信号频谱幅值是不同的。从频域角度上讲,不同的隐蔽信号频谱组成相对于宿主信号的隐蔽性能也是不相同的。这从物理概念上分析也是容易理解的,TDCS 隐蔽信号是以时频域重叠的方式叠加于宿主信号之上进行隐蔽通信的,对于宿主信号的某个频点来说,相同频谱位置是否分布隐蔽信号的频谱,叠加前后的感知失真度是不一样的。针对这种情况,对于不同门限设置条件下的隐蔽系统 Q 因子做了仿真分析,其结果如图 2 所示,其中信噪比固定取为 -8dB ,干信比同样设置为 $0 \sim 15\text{dB}$,而 TDCS 基函数门限共设 5 级,其门限值大小取为宿主信号频谱幅值最大值的 $0.1 \sim 0.5$ 倍,即图中的门限 1 - 5。

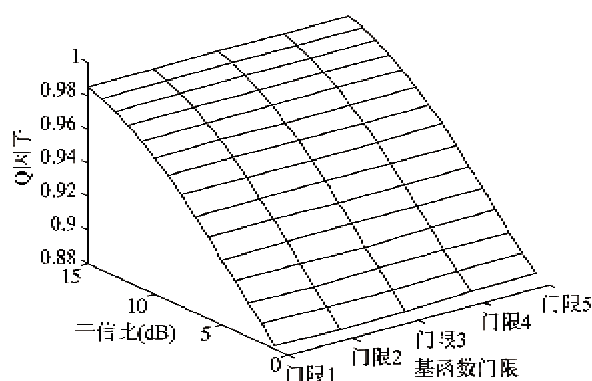


图 2 不同门限条件下的隐蔽通信系统 Q 因子

从图 2 中可以看出,不同门限设置条件下的系统 Q 因子几乎是相同的,即 Q 因子度量认为该条件下 TDCS 隐蔽信号叠加前后的感知失真度是相同的,这与前面的分析存在着矛盾。从而也证明了 Q 因子度量方法应用于 TDCS 重叠隐蔽通信的局限性。

4 基于频域加权的均方误差度量方法

4.1 度量方法的提出

前面分析的 Q 因子度量方法由于在 TDCS 重叠隐蔽通信应用时主要体现为时域信号相关性与功率的差别,因此,对于不同门限设置条件下的 TDCS 重叠通信的感知失真度量效果不理想,不能较好地反映隐蔽性能的优劣。而其他方法如均方误差方法和峰值信噪比方法尽管计算简便,在数字水印等信息隐藏领域具有广泛的应用价值,在一定程度上能反映信息隐藏的感知失真度,但是应用于 TDCS 重叠

隐蔽通信时,算法计算的样本为时域信号的采样幅值,而 TDCS 时域信号具有时变的特点,不同时刻的采样值不尽相同,因此,运用这一类方法计算出的结果并不可靠。所以需要根据 TDCS 重叠隐蔽通信的本质特性,提出适合 TDCS 重叠隐蔽通信的感知失真度量方法。

根据 TDCS 的收发原理可以看出,TDCS 是在频域设计的发射信号波形,在门限判决的基础上,在相应频谱位置上将高于门限的设置为 0,低于门限的设置为 1,通过这种处理方式使收发双方同时避免使用被占用的频谱进行传输,这就相当于双方找到了一个干净的频段进行通信,使得接收信噪比不会因为干扰的存在而下降,从而达到了强抗干扰的目的。所以以这种方式将隐蔽信号重叠于宿主信号具有了较好的通信能力,同样对于宿主信号来说,TDCS 重叠隐蔽信号对其通信的影响也降至最低。显然,这种抗干扰效果与系统的隐蔽性是矛盾的,隐蔽通信要求隐蔽信号藏在宿主信号之中,不管在什么域如时域或者频域都需要尽量不被宿主通信系统发现其存在,而 TDCS 则是在频域尽量地使用未被使用的频谱进行通信。这也说明了抗干扰与隐蔽性是成反比的关系。当然在 TDCS 基函数设计时可以根据系统需要使得隐蔽信号在抗干扰与隐蔽性之间达到均衡。从另一个角度上讲,这也为我们提供了一个衡量隐蔽系统感知失真度的一个方法,对于宿主信号,不同的频谱分布对于重叠的隐蔽信号的感知失真是不一样的,即各频点的感知失真与其频谱幅值成反比。也就是说以同一频谱幅度叠加于不同频谱幅度的宿主信号上,频谱幅值大的感知失真度必然要小于频谱幅值小的。因此,在借鉴均方误差度量方法的基础上,将均方误差度量从时域搬到频域,根据隐蔽信号与宿主信号的频谱分布来度量重叠隐蔽通信的感知失真度,这种方法即称为基于频域加权的均方误差度量方法。

同时,隐蔽信号及宿主信号功率也体现在频谱幅值上,TDCS 隐蔽系统的抗干扰能力也与基函数幅度谱设计密切相关,这种度量方法将隐蔽性能与信号功率度量方法和抗干扰能力联系在了一起,并且这种度量方法与隐蔽系统采用什么方式实现没关系,因此也适用于基于直接序列扩频方式实现的隐蔽系统,较好地满足了感知失真度量方法的基本原则。

4.2 频域加权均方误差定义

设 J_k 、 Z_k 和 S_k ($k = 0, 1, \dots, N-1$) 分别为归一

化带宽内宿主信号、信道噪声和重叠之后接收信号第 k 个频点的频谱幅度,基于频域加权的均方误差则定义为

$$wMSE = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k |S_k - J_k - Z_k|^2 \quad (2)$$

其中 α_k 为第 k 个频点的加权因子,定义为

$$\alpha_k = \frac{a}{P_{j_k} |J_k + Z_k|^2} \quad (3)$$

式中 P_{j_k} 为背景信号即宿主信号和信道噪声的平均功率, a 为调整因子。由 $wMSE$ 的定义可以得到,与 Q 因子衡量方法不同, $wMSE$ 的大小与感知失真成正比,即 $wMSE$ 值越大表示感知失真越严重。

由前面的分析可以得到宿主信号对于叠加的隐蔽信号的感知失真不仅与宿主信号的平均功率有关,在局部上与宿主信号各频点的频谱幅值大小也成反比关系。因此,在计算隐蔽信号叠加前后频谱均方误差的基础上,分别对各频点计算增加一个加权因子,该因子综合考虑了宿主信号的平均功率和各频点频谱幅值的影响。因此,相比较其他度量算法,这种度量方法更适合于重叠的隐蔽通信系统。

4.3 实验结果

为了验证所提方法的有效性,与上一节相同的实验条件下,针对 TDCS 重叠隐蔽通信做了仿真实验,同时,在仿真中比较了采用直接序列扩频实现的重叠隐蔽通信的相关性能,进一步对算法做仿真验证。

图 3 分别给出了当隐蔽信号信噪比为 $-8 \sim -18\text{dB}$ 、干信比为 $0 \sim 15\text{dB}$ 时,采用式(2)计算的 TDCS 隐蔽系统和直接序列扩频隐蔽系统的频域加权均方误差曲面,其中 TDCS 门限设置取门限 1、门限 2 和门限 3。为了使区别更为明显,设置的 3 个门限取值为宿主信号频谱幅值最大值的 0.1 倍、0.5 倍和 0.7 倍。从图中单个曲面可以看出,隐蔽系统

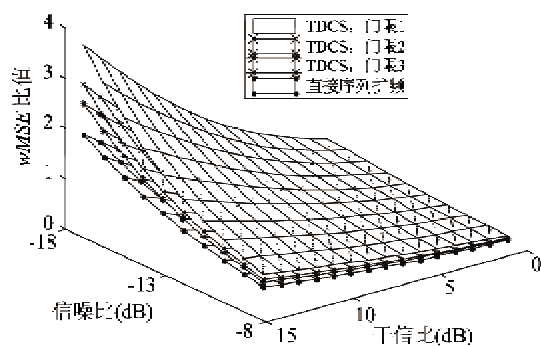


图 3 TDCS 与直扩隐蔽系统的 $wMSE$ 曲面图

的 $wMSE$ 值大小与系统信噪比和干信比分别成正反比,与 $wMSE$ 的定义相一致,这种计算方法也与基于功率度量的感知结果相符,证明了此方法计算的正确性。

对比门限 1、门限 3、门限 5 条件下的 TDCS 和直接序列扩频实现的隐蔽系统的 $wMSE$ 曲面,可以看出相同信噪比与干信比条件下,不同门限设置的 TDCS 与直接序列扩频隐蔽系统的 $wMSE$ 计算值结果不相同,随着 TDCS 门限的升高 $wMSE$ 的计算结果也随着降低,相同条件下直接序列扩频的计算值最低。显然, $wMSE$ 的计算结果与实际感知结果是相符的,对于 TDCS 来说,在相同功率条件下门限设置取值越低意味着隐蔽信号在宿主信号频谱空闲部分所重叠的信号功率越大,因此感知失真也越大,而对于直接序列扩频实现的隐蔽系统相当于把整个隐蔽信号功率平均分布于宿主信号整个频谱带宽中,因此重叠之后的感知失真也就最小。图 3 所示结果充分表明了提出的 $wMSE$ 度量方法要优于 Q 因子度量的方法,与重叠隐蔽通信系统更加吻合。

在仿真中还对隐蔽通信系统与宿主通信系统的通信能力做了仿真分析,其中隐蔽系统与宿主系统调制方式均采用正交相移键控 (quadrature phase shift keying, QPSK) 调制。图 4 与图 5 分别给出了采用 TDCS 和直接序列扩频实现条件下隐蔽通信系统与宿主通信系统的误码率曲面,其中图 5 的隐蔽系统信噪比取为 -8dB 。显然,隐蔽信号信噪比越大,干信比越小,隐蔽通信系统的误码率则越小,相反的,宿主通信系统的误码率则越大,图 4 的仿真结果明显反映了这种误码率变化趋势,而图 5 也大致反映了这一种趋势。对比图 3 给出的感知失真度量结果,可以发现在相同信噪比与干信比条件下,当隐蔽系统的感知失真越大即隐蔽性能越差时,隐蔽通

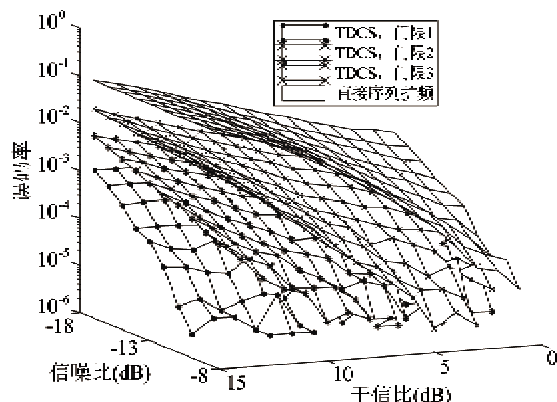


图 4 TDCS 与直扩隐蔽系统误码率曲面图

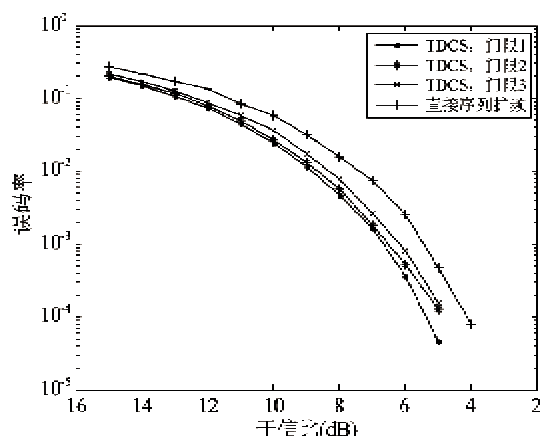


图5 隐蔽信号重叠条件下宿主通信系统误码率

信系统与宿主通信系统的误码率越大,即相互之间的抗干扰能力越差,从而很好验证了隐蔽系统的隐蔽能力与抗干扰能力即隐蔽系统鲁棒性是相互矛盾的这一推论^[2]。结合图3、图4与图5的仿真结果可以为设计一定隐蔽性能与抗干扰能力的隐蔽系统提供借鉴,同时对比TDCS与直接序列扩频的实现方式,可以得出TDCS用于重叠隐蔽通信相对于直接序列扩频的优越性,这是因为在相同隐蔽信号功率条件下TDCS可以通过设计基函数的门限取值使系统符合一定的隐蔽性能与抗干扰性能要求。

5 结论

本文从隐蔽信号叠加之后引起宿主信号的失真程度出发,结合信息隐藏领域已有的感知失真度量方法,对重叠隐蔽通信系统的隐蔽性能度量方法进行了分析。针对重叠隐蔽通信的特点,将Q因子度量应用于TDCS重叠隐蔽通信系统,通过仿真分析了Q因子度量的有效性,同时得出Q因子度量无法度量不同门限设置条件下的TDCS隐蔽通信系统的隐蔽性度量。针对此问题,根据TDCS重叠隐蔽通信的基本原理,将信号的感知失真度量从时域转换到频域进行,仿真结果表明这种度量方法不仅体现了叠加信号之间的功率相关性,并且体现了不同宿主信号频谱幅值对于叠加的隐蔽信号的感知失真程度,从而提高了感知失真的度量效果,与实际感知效果相符。本文提出的隐蔽性能度量方法为重叠隐蔽通信的系统设计与应用奠定了基础,具有一定的理论意义和实用价值。

基于频域加权的均方误差感知失真度量方法是以理想的信道以及系统收发为条件的。当重叠的隐蔽通信系统中存在功率受限或者非线性失真情况时,发送端隐蔽信号与宿主信号的频谱分布必然受到改变。此时,如果发送端还是以失真前的信号为条件进行度量,其结果必然无法与接收端的实际感知效果相符。因此,系统功率以及非线性失真条件下的隐蔽性能感知是将来需要进一步研究的内容。

参考文献

- [1] Chakravarthy V, Shaw A K, Temple M A, et al. Cognitive radio - an adaptive waveform with spectral sharing capability. In: IEEE Wireless Communications and Networking Conference, New Orleans, USA, 2005. 724-729
- [2] Faisal A. Theory and Applications of Information Hiding in Still Images [Ph. D dissertation]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2001
- [3] Huib D R. Minkowski-metrics as a combination rule for digital-image-coding impairments. In: SPIE Human Vision, Visual Processing, and Digital Display III Conference, San Jose, USA, 1992. 16-26
- [4] Starovoitov V V, Kose C, Sankur B. Generalized distance based matching of nonbinary images. In: International Conference on Image Processing, Chicago, USA, 1998. 803-809
- [5] Tan D M, Tan C S, Wu H R. Perceptual color image coding with JPEG2000. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(2): 374-383
- [6] 马秀莹,林家骏. 信息隐藏性能评价方法. 中国图象图形学报, 2011, 16(2): 209-214
- [7] 王颖慧,刘万军. 基于MSB和HVS的空域信息隐藏算法的研究. 计算机科学, 2012, 39(9): 89-93
- [8] Wang B, Wang Z B, Liao Y P, et al. HVS-based structural similarity for image quality assessment. In: Processing of the 9th International Conference on Signal Processing, Piscataway, USA, 2008. 36-29
- [9] Youngseok L, Jongweon K. Pseudonoise sequence generation with improved imperceptibility for audio watermarking. In: 2012 International Symposium on Computer, Consumer and Control, Taichung, China, 2012. 119-122
- [10] Gao B K, Sha B L, Zhang Y B, et al. HVS-based image compression scheme in wavelet-contourlet domain. *Advances in Information Sciences and Service Sciences*, 2012, 4(2): 160-166

A covert metric method for overlay transform domain covert communication systems

Xie Tiecheng^{**}, Da Xinyu^{*}, Chu Zhenyong^{*}, Zhang Hengyang^{*}, Wang Shu^{*}

(^{*} School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077)

(^{**} Unit 94900 of PLA, Zhangzhou 363000)

Abstract

A perceptual distortion measurement method based on the frequency weighted mean square error (MSE) is proposed to evaluate overlay transform domain covert communication systems' covert performance. For avoiding the limitations of the Q factor metric method used in overlay transform domain covert communication systems, the MSE-based method converts the perceptual distortion of a signal from the time-domain to the frequency-domain to measure it according to the basic principle of transform domain communication systems (TDCS). The perceptual distortion of the system is obtained by summing the perceptual distortions of the host signal at each frequency, with the host signal spectrum reciprocals as the weighting factors. This is based on the fact that the perceptual distortion strength which is impacted by the overlapped covert signal is related to the host signal spectrum. The simulation results show that the proposed method can improve the system perceptual distortion ability. The assessment results of this method are consistent with the basic mechanism of the overlay covert communication and agree with actual perception. The method unifies the system perceptual ability and anti-jamming ability, which may offer some useful information for the design of covert systems.

Key words: transform domain communication system(TDCS), overlay covert communication, covert metric, perceptual distortion metric, frequency weighted, mean square error (MSE)