



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104618005 A

(43) 申请公布日 2015. 05. 13

(21) 申请号 201510044229. X

(22) 申请日 2015. 01. 28

(71) 申请人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁西路 28 号

(72) 发明人 殷勤业 俱莹 陈媛 杨骞  
王慧明

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任  
公司 61200

代理人 闵岳峰

(51) Int. Cl.

H04B 7/06(2006. 01)

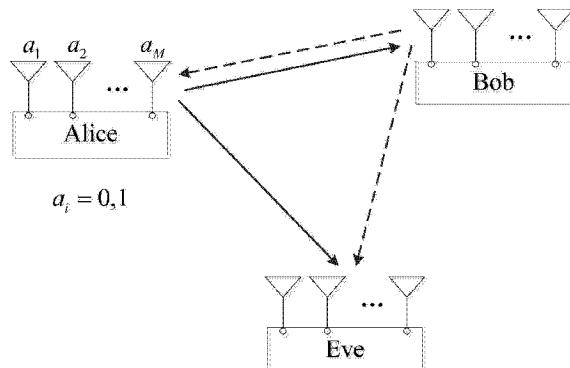
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

发射聚焦式的多天线跳空安全通信方法

(57) 摘要

发射聚焦式的多天线跳空安全通信方法，在训练阶段，由合法接收用户发射训练信号，发射端通过检测和处理得到下一阶段用于发射的相位值；在发射信号阶段，发射端根据跳空图案选择多根用于发射信号的天线，将训练阶段检测到的相位取反，加载信息后使信号原路返回，在合法接收用户的发射天线处同相叠加，从而使能量聚焦于合法接收用户处，合法接收用户的每根天线分别进行内积相关检测，用来发射训练信号的天线可正确解调信号，其余天线根据正确解调的天线消除偏差，平均所有接收天线上解得的相位，解调出正确的信息，而窃听者却难以正确接收和截获信息。仿真实验表明，合法接收用户的误符号率在低信噪比时保持较低的水平，而窃听者的误符号率却很高。



$$a_i = 0, 1$$

1. 发射聚焦式的多天线跳空安全通信方法,采用发射端和合法接收用户均配置多天线的传输模型,其特征在于,包括如下步骤:

1) 训练阶段:

a、由合法接收用户发射训练信号;

b、发射端接收训练信号,并对每根天线上接收到的训练信号进行内积相关检测,得到发射信号阶段用来处理信号的相位值;

2) 发射信号阶段:

a、发射端选取一种调制方式将要发送的信息调制为射频信号,根据跳空图案选取要发射信号的天线;

b、发射端将训练阶段检测到的相位取反,加载信息后使合法接收用户发来的信号原路返回,在合法接收用户处同相叠加;

c、合法接收用户的每根天线分别进行内积相关检测,用来发射训练信号的第 k 根天线能够正确解调信号,其余天线根据第 k 根天线检测出的相位求取并消除相位偏差,平均所有天线上解得的相位值,得到最终的解调信号。

2. 根据权利要求 1 所述的发射聚焦式的多天线跳空安全通信方法,其特征在于,发射端配置 M 根天线,M ≥ 2,合法接收用户配置 K 根天线,K ≥ 2,发射端和合法接收用户的相邻天线间距离均大于一个波长。

3. 根据权利要求 1 所述的发射聚焦式的多天线跳空安全通信方法,其特征在于,训练信号是由合法接收用户的第 k 根天线发出的,为反向训练,且训练信号的初相由合法接收用户随机选取,无需告知发射端。

4. 根据权利要求 1 所述的发射聚焦式的多天线跳空安全通信方法,其特征在于,发射端每次根据跳空图案随机选取多根天线发射信号以实现发射聚焦,天线的切换是利用电子开关实现的。

## 发射聚焦式的多天线跳空安全通信方法

### 技术领域：

[0001] 本发明涉及无线通信安全传输方法,特别涉及一种发射聚焦式的多天线跳空安全通信方法。

### 背景技术：

[0002] 近年来,无线通信给人们的生活带来了便利,但电磁波的广播特性和无线信道的开放性却使通信的安全性面临着挑战,因而无线安全通信成为了通信领域研究的热点。跳频技术是一种常用的安全通信的方法,但是跳频通信存在一些难以克服的缺点,如占用大量的频谱资源、天线尺寸需要随着频率的变化而改变、跳速受到锁相环路以及天线尺寸变化速度的限制等。另外,窃听者一旦窃取跳频图案,在任何位置都能正确解调信息,其根本原因是频率和位置无关,跳频技术并没有利用无线通信的特性。

[0003] 无线信道具有时频域之外的空域特性,若能将空谱资源合理利用,既能解决频谱资源日渐匮乏的问题,又能利用空谱的多样性来最大化合法接收用户和窃听者信道之间的差异性,就能在保证合法接收用户的通信质量的前提下实现通信的安全性。

[0004] 0/1 式跳空技术是一种利用空谱资源来提高通信的保密性的方法,发射端电子开关在发射天线间快速切换,每次根据跳空图案选择不同的天线发射信号,使得信道随着天线的变化而不断变化。

[0005] 基于前向训练的 0/1 式跳空技术发射端发送训练序列,接收端使用训练得到权值在正式通信时进行解调,就能得到规整的星座图。但是一旦窃听者知道了跳空图案并能掌握时机和合法接收用户一起参与训练,那么窃听者也能正确解调信号。

[0006] 权值反馈型的 0/1 式跳空技术采用反向训练的方法,由接收端发射训练序列,发射端得到收发天线间的信道信息后反馈给接收端,接收端利用信道的互易性设计权值,通过跳空图案正确加权来解调信号。但是需要一个反馈信道信息的过程,不仅降低了效率,而且反馈信道信息的过程中有可能会出错,使得通信的可靠性难以保证。

### 发明内容：

[0007] 本发明的目的在于提供一种发射聚焦式的多天线跳空安全通信方法,该通信方法通过利用时频域之外的空谱资源,采用发射聚焦的传输方法,使信号在合法接收用户处同相叠加,最大化合法接收用户和窃听者信道之间的差异性,在保证合法接收用户通信质量的前提下实现通信的安全性。

[0008] 为达到以上目的,本发明采取如下的技术方案予以实现:

[0009] 发射聚焦式的多天线跳空安全通信方法,采用发射端和合法接收用户均配置多天线的传输模型,包括如下步骤:

[0010] 1) 训练阶段:

[0011] a、由合法接收用户发射训练信号;

[0012] b、发射端接收训练信号,并对每根天线上接收到的训练信号进行内积相关检测,

得到发射信号阶段用来处理信号的相位值；

[0013] 2) 发射信号阶段：

[0014] a、发射端选取一种调制方式将要发送的信息调制为射频信号，根据跳空图案选取要发射信号的天线；

[0015] b、发射端将训练阶段检测到的相位取反，加载信息后使合法接收用户发来的信号原路返回，在合法接收用户处同相叠加；

[0016] c、合法接收用户的每根天线分别进行内积相关检测，用来发射训练信号的第 k 根天线能够正确解调信号，其余天线根据第 k 根天线检测出的相位求取并消除相位偏差，平均所有天线上解得的相位值，得到最终的解调信号。

[0017] 本发明进一步的改进在于，发射端配置 M 根天线， $M \geq 2$ ，合法接收用户配置 K 根天线， $K \geq 2$ ，发射端和合法接收用户的相邻天线间距离均大于一个波长。

[0018] 本发明进一步的改进在于，训练信号是由合法接收用户的第 k 根天线发出的，为反向训练，且训练信号的初相由合法接收用户随机选取，无需告知发射端。

[0019] 本发明进一步的改进在于，发射端每次根据跳空图案随机选取多根天线发射信号以实现发射聚焦，天线的切换是利用电子开关实现的。

[0020] 与现有技术相比，本发明的有益成果是：

[0021] 1、本发明的核心是发射聚焦，由于发射端多根天线收到的是合法接收用户发出的同一个信号，原路返回必然会在合法接收用户的发射天线处同相叠加。而窃听者收到的信号就不能保证同相叠加，即使在距离较近的地方，也有可能会反向抵消。通过发射聚焦，合法接收用户的接收信噪比显著提高，而窃听用户的接收信噪比并未改善，使得合法接收用户的信噪比明显优于窃听用户的信噪比，增加了安全性。另外，有了发射聚焦的技术，就能采用多根天线同时发射的跳空模式，较前几种每次只能一根天线发射的跳空技术的安全性更高。

[0022] 2、合法接收用户发出的信号只有合法接收用户自己知道，无需告知发射端，发射端只负责加载信息后发回给合法接收用户，避免了交换信息过程中被窃听者截获的风险。即使窃听者收到信号并掌握时机参与了训练，不知道合法接收用户发出的原始信号，也不能解调出正确的信息。合法接收用户每次发出信号的初始相位随机选取，即使窃听者偶然一次解调正确，合法接收用户换了发射信号后窃听者仍然不能解调，相当于“一次一密”。

[0023] 3、跳空技术通过切换电子开关实现发射天线的切换，天线的快速切换使信道迅速变化，使窃听者难以截获信息。跳空技术的扩空增益取决于天线的跳速和跳幅，电子开关切换可使跳速达到很高的水平，远高于跳频技术可达到的跳速。且天线分布式排布，距离可以很远，又能获得很大的跳幅，因此，跳空技术可获得高扩空增益，在保证通信质量的同时又能提高通信的安全性。

#### 附图说明：

[0024] 图 1 是本发明所涉及的发射聚焦式安全通信技术的系统模型图。

[0025] 图 2 是合法接收用户和窃听用户在不同信噪比下的误符号率图，其中，图 2(a) 为线性坐标下的合法接收用户和窃听用户在不同信噪比下的误符号率图，图 2(b) 为对数坐标下的合法接收用户和窃听用户在不同信噪比下的误符号率图。

[0026] 图 3 是发射端不同发射天线数目下的误符号率图。

### 具体实施方式：

[0027] 下面结合附图和具体实施方式对本发明做进一步详细说明。

[0028] 本发明所涉及的发射聚焦式安全通信技术的系统模型如图 1 所示,发射端 Alice 和合法接收用户 Bob 均配置多天线,侦听方 Eve 为了获取信息也增设多天线。其中,Eve 只窃听消息而不发射信号。

[0029] 在分析信道模型时,有如下假设 :①传播介质是均匀线性和各向同性的 ;②各阵元间距离大于波长  $\lambda$ ,阵元间的影响可忽略不计 ;③各阵元和信道中的噪声均为高斯加性白噪声,是相互独立的,且与信号无关 ;④信道是慢变的,即在通信的一段时间内信道特性认为是恒定的。

[0030] 通信双方使用相同的载波频率,采用窄带信号模型,则解析化的发射信号为  $s(t) = s_0 e^{j(\omega t + \phi_0)} p(t)$ ,  $s_0$  和  $\phi_0$  分别为发射信号的幅度和初相,  $\omega$  为载波频率,  $p(t)$  是调制信号的包络。

[0031] 信号在空间经过多径传输,经过不同的延时和衰减后,假设有 J 条路径(包括直射径和反射径),接收端的信号为 :

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_{i=1}^J b_i s[t - \tau_i(x_i, y_i, z_i)] + n(t) \\ [0032] &= \sum_{i=1}^J b_i e^{-j\omega\tau_i(x_i, y_i, z_i)} s_0 e^{j(\omega t + \phi_0)} p[t - \tau_i(x_i, y_i, z_i)] + n(t) \end{aligned} \quad (1)$$

[0033] 式中,  $b_i$  和  $\tau_i(x_i, y_i, z_i)$  分别表示第 i 条多径的幅度衰减和延时,其中,  $(x_i, y_i, z_i)$  为等价电波传输距离的三维空间分量,  $n(t)$  为零均值的加性高斯白噪声。对于第 i 条路径,信号延时  $\tau_i(x_i, y_i, z_i)$  后到达接收端,在此之前,第 i 条路径的到达信号为 0。

[0034] 当码元时间大于多径时延扩展时,所有路径的信号都到达后,会有一段所有路径信号相叠加的平稳阶段,检测时,只考虑这段平稳的正弦信号,各个天线分别进行检测。

[0035] 1) 训练阶段 :

[0036] a、由合法接收用户 Bob 的第 k 根天线发射训练信号,初相  $\phi_0$  随机选取,发送训练信号的天线 k 也为随机选取。Alice 接收到的信号为 :

$$[0037] \mathbf{x}_A(t) = \mathbf{h}_k s_0 e^{j(\omega t + \phi_0)} + \mathbf{n}_A(t) \quad (2)$$

[0038] 式中,  $\mathbf{h}_k = [h_{k1}, h_{k2}, \dots, h_{kM}]^T = [b_{ki} e^{j\theta_{k1}}, b_{ki} e^{j\theta_{k2}}, \dots, b_{ki} e^{j\theta_{kM}}]^T$ , 其中  $h_{ki}$  代表 Bob 的第 k 根天线到 Alice 的第 i 根天线的多条路径综合作用的等价幅度衰减和相移,  $b_{ki}$  和  $\theta_{ki}$  分别为幅度衰减和相移,  $\mathbf{n}_A(t)$  为高斯白噪声。

[0039] b、发射端 Alice 对每根天线上接收到的信号进行 N 倍过采样,并用 L 个周期长的初相为 0 的相关序列  $r_A(n) = e^{j\frac{2\pi}{N}n}$  对采样后的信号进行内积相关检测,第 i 根天线的相关结果为 :

[0040]

$$\begin{aligned}
R_i(m) = & \langle x_{Ai}(n), r_A(n) \rangle = E[h_{ki} s_0 e^{j\frac{2\pi}{N}(n+m)} e^{j\theta_0} r_A^*(n)] \\
= & \frac{1}{LN} \sum_{n=0}^{LN-1} h_{ki} s_0 e^{j\frac{2\pi}{N}(n+m)} e^{j\theta_0} e^{-j\frac{2\pi}{N}n} \\
= & b_{ki} s_0 e^{j(\theta_k + \theta_0)} e^{j\frac{2\pi}{N}m}
\end{aligned} \tag{3}$$

[0041] 式中,  $E[\cdot]$  为数学期望, 由式 (3) 可得到训练阶段的相位值  $\theta_{ki} + \Phi_0$ , 这也是后续发射信号阶段每根天线上用来进行信号加权所需的相位值。

[0042] 2) 发射信号阶段 :

[0043] a、发射端 Alice 选取一种调制方式将要发送的信息调制为射频信号, 根据跳空图案选取 G 根要发射信号的天线, 将选取的 G 根天线序号的集合记为 ST。

[0044] b、Alice 将这 G 根天线上在训练阶段检测到的相位  $\theta_{ki} + \Phi_0$  取反, 加载通信信息  $y = A_s e^{j\theta_s}$  后按原始路径发回给 Bob, 此时 Alice 的发射信号为 :

$$[0045] \quad \mathbf{s}_A(t) = [A_s e^{j(\omega t + \theta_s)}] \text{diag}\{\mathbf{a}\} \mathbf{c} \tag{4}$$

[0046] 式中,  $\text{diag}\{\cdot\}$  表示对角线元素为  $\{\cdot\}$  的对角阵,  $\mathbf{c} = [e^{-(\theta_1 + \theta_{k1})}, e^{-(\theta_2 + \theta_{k2})}, \dots, e^{-(\theta_M + \theta_{kM})}]^T$  表示将 Alice 检测到的相位取反,  $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_M]^T$  是根据跳空图案产生的开关向量, Alice 选择第 i 根天线发射时  $a_i = 1$ , Alice 不选择第 i 根天线发射时  $a_i = 0$ 。

[0047] 假设信道互易, Bob 的第 k 根和第 1 ( $1 \neq k$ ) 根天线收到的信号分别为 :

$$x_{Bk}(t) = \mathbf{h}_k^T \mathbf{s}_A(t) + n_{Bk}(t)$$

$$\begin{aligned}
[0048] \quad & = A_s e^{j(\omega t + \theta_s)} \mathbf{h}_k^T \text{diag}\{\mathbf{a}\} \mathbf{c} + n_{Bk}(t) \\
& = \sum_{i \in S_T} b_{ki} A_s e^{j(\omega t + \theta_s)} e^{-j\theta_0} + n_{Bk}(t)
\end{aligned} \tag{5}$$

$$x_{Bl}(t) = \mathbf{h}_l^T \mathbf{s}_A(t) + n_{Bl}(t)$$

$$\begin{aligned}
[0049] \quad & = A_s e^{j(\omega t + \theta_s)} \mathbf{h}_l^T \text{diag}\{\mathbf{a}\} \mathbf{c} + n_{Bl}(t) \\
& = \sum_{i \in S_T} b_{li} A_s e^{j(\omega t + \theta_s)} e^{-j\theta_0} e^{j(\theta_l - \theta_k)} + n_{Bl}(t)
\end{aligned} \tag{6}$$

[0051] 式中,  $n_{Bk}(t)$  和  $n_{Bl}(t)$  为高斯白噪声。

[0052] c、合法接收用户 Bob 的每根天线分别进行内积相关检测, 由于相位  $\Phi_0$  是训练阶段由 Bob 发出的, 所以 Bob 端已知此相位, 并用  $r_B(k) = e^{-j\theta_0} e^{j\frac{2\pi}{N}n}$ , 即初相为  $-\Phi_0$  的相关序列进行内积相关检测, 第 k 根和第 1 ( $1 \neq k$ ) 根天线的相关检测结果分别为 :

$$[0053] \quad \xi_{Bk} = e^{j\theta_s} \sum_{i \in S_T} A_s b_{ki} \tag{7}$$

$$[0054] \quad \xi_{Bl} = e^{j\theta_s} \sum_{i \in S_T} A_s b_{li} e^{j(\theta_l - \theta_k)} = e^{j\theta_s} B_l e^{j\beta_k} \tag{8}$$

[0055] 将  $\sum_{i \in S_T} A_s b_{li} e^{j(\theta_l - \theta_k)}$  写为  $B_l e^{j\beta_k}$  的形式, 至此, 用来发射训练信号的 Bob 的第 k 根天线得到了信号相位  $\theta_s$ , 并且可以看到, Alice 的 G 根天线发来的信号在 Bob 的第 k 根天线处具

有相同的相位,可正确解调信号,并且实现了同相叠加;而除天线 k 之外,其余天线解调后信号的星座图均发生了旋转,第 l( $l \neq k$ ) 根天线可根据第 k 根天线检测出的相位求得自己的相位偏差  $\beta_1$ ,通过消除偏差,就能正确解调。每次当跳空图案变化时,求解一次天线 l( $l \neq k$ ) 的相位偏差值,后续收到的符号根据此偏差值解调。平均所有接收天线上解得的相位得到最终相位值,从而解调出正确的信息。

[0056] 仿真实验验证了 QPSK 调制方式下本发明的安全保密性,其中侦听方 Eve 采用与合法接收用户 Bob 相同数量的天线。

[0057] 参见图 2,在多个信噪比情况下对比合法接收用户和侦听方的误符号率,可以发现:合法接收用户 Bob 在信噪比 -15dB 以上时均能以非常小的误符号率恢复原始信号,而侦听方 Eve 的误符号率一直在 0.75 左右,这么高的误符号率使得 Eve 根本无法窃取到任何信息,而且 Eve 的误符号率与信噪比无关,主要是 Eve 和 Bob 的信道差异造成的,跳空的传输机制正是利用了空谱的多样性来最大化这种差异。

[0058] 参见图 3,发射端每次随机选取不同天线数目发射信号时 Bob 的误符号率,误符号率随发射天线数目的增加而减小,Alice 选取 1 根天线发射时的性能明显不如选取多根天线发射,因而发射聚焦技术使得多根天线发射的信号在 Bob 端同相叠加提高了安全性,优于每次只能用一根天线发射的跳空技术。

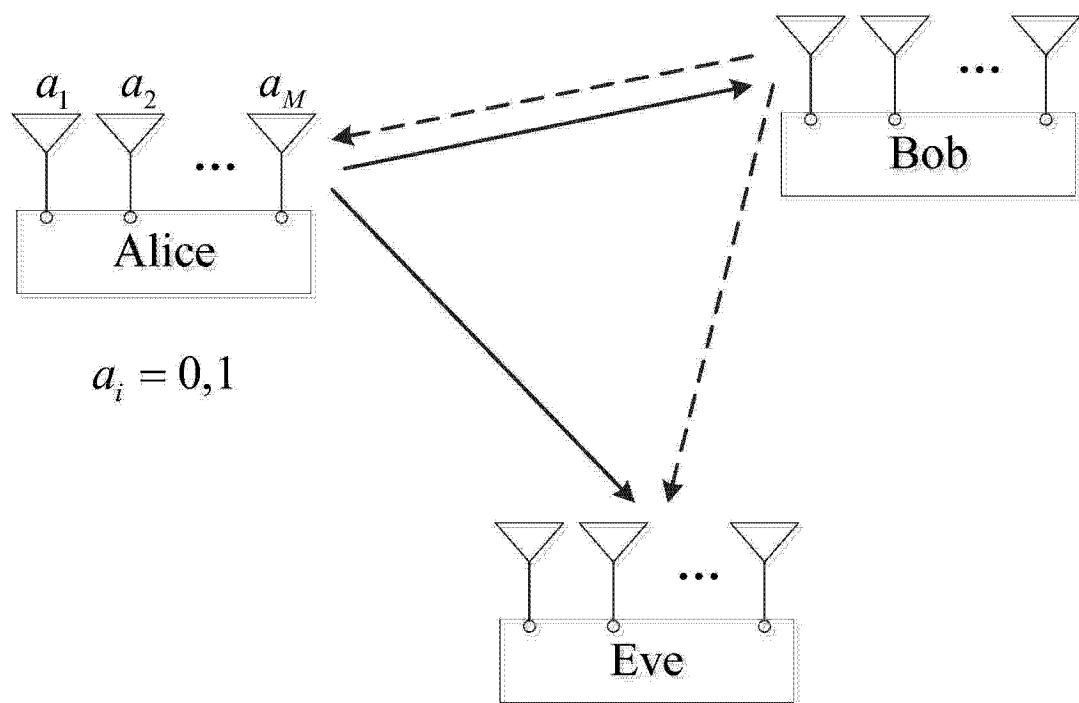
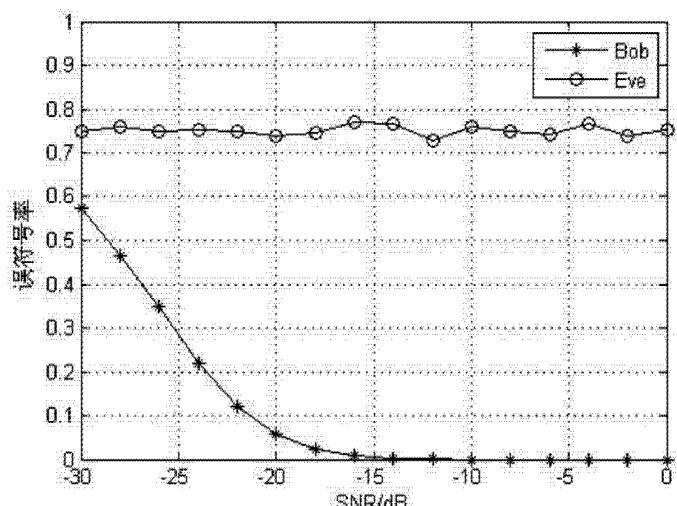
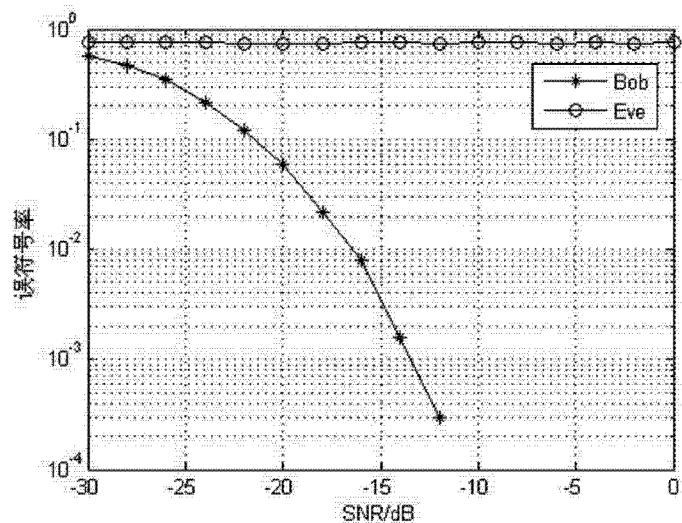


图 1



( a )



( b )

图 2

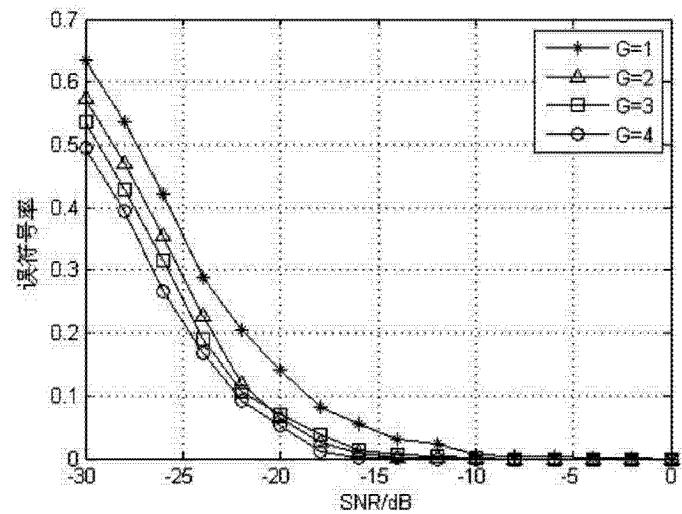


图 3